



UNIVERSITAT POLITÈCNICA DE CATALUNYA
BARCELONATECH

Escola Tècnica Superior d'Enginyeries
Industrial i Aeronàutica de Terrassa

Titulació:

Máster en Ingeniería Industrial

Alumno:

Marc Martinez Estrada

Título TFM:

Estudio de sensores textiles para su uso en bioinstrumentación

Director del TFM:

Raúl Fernández García

Convocatoria de entrega:

Junio 2018

Contenido de este volumen: **MEMORIA**



ESTUDIO DE SENSORES TEXTILES PARA SU USO EN BIOINSTRUMENTACIÓN.

Escola Superior d'Enginyeria
Industrial, Aeroespacial i Audiovisual
de Terrassa. ESEIAAT

Master en Ingeniería Industrial

Autor: **Marc Martínez Estrada**

Director del TFM: **Raúl Fernández García**

Junio 2018

SUMARIO

1	Objeto.....	5
2	Alcance	5
3	Especificaciones.....	5
4	Justificación.....	5
5	Estado del arte	6
6	Diseño del sensor de humedad	12
6.1	Materiales	13
6.2	Geometría.....	14
6.3	Diseños	16
6.3.1	Primer prototipo	16
6.3.2	Primer prototipo con escala reducida.....	16
6.3.3	Primer prototipo con reducción de ramas	17
6.4	Bordado	17
7	Metodología experimental.	18
7.1	Metodología de simulación	18
7.2	Metodología de bordado	18
7.3	Metodología de toma de medidas	20
8	Resultados del estudio	22
8.1	Primer prototipo del sensor de humedad	22
8.2	Segundo prototipo del sensor de humedad.....	33
8.3	Reproducibilidad del sensor diseñado	41
8.4	Primera regresión del sensor	51
9	Acciones futuras.....	56
10	Viabilidad económica.....	57
11	Viabilidad ambiental.....	58
12	Plan de seguridad.....	59
13	Conclusiones	60
13.1	Principales contribuciones científicas del estudio.....	60
14	Referencias	61

Lista de figuras y tablas

Ilustración 1: Disposición capas del sensor.....	7
Ilustración 2: Esquema de conexión de acondicionamiento	7
Ilustración 3: Hilo de SWCNT/PVA	8
Ilustración 4: Gráfica Resistencia-Humedad relativa	8
Ilustración 5: Patrón del sensor.....	9
Ilustración 6: Gráfica Impedancia-Humedad relativa	9
Ilustración 7: Colocación del patrón.	10
Ilustración 8: Gráfica de los rangos de sensibilidad del sensor	10
Ilustración 9: Patrón bordado con hilo de fibras de plata	10
Ilustración 10: Gráficas de sensores realizados con PEDOT	11
Ilustración 11: Geometría utilizada para el sensor	12
Ilustración 12: Tejido de calada con estructura de tafetán.....	13
Ilustración 13: Sección de una fibra de Nylon recubierta de plata.	14
Ilustración 14: Geometría del sensor elegida	14
Ilustración 15: Primer prototipo front y reverse.....	16
Ilustración 16: Variación escala front y reverse	17
Ilustración 17: Variación número de ramas front y reverse.....	17
Ilustración 18: Maquina para bordar Singer Future	19
Ilustración 19: Realización del primer bordado.....	19
Ilustración 20: Cámara climática	20
Ilustración 21: LCR Programmable	21
Ilustración 22: Marco usado para las mediciones.....	21
Ilustración 23: Gráfico de las impedancias en seco y húmedo a diferentes frecuencias.	23
Ilustración 24: Gráfico de las impedancias en seco y húmedo a diferentes frecuencias del sensor 0.1	24
Ilustración 25: Gráfico de las impedancias en seco y húmedo a diferentes frecuencias.	25
Ilustración 26: Gráfica de los valores de resistencia del primer prototipo.	29
Ilustración 27: Gráfica de los valores de reactancia del primer prototipo.....	30
Ilustración 28: Gráfica de los valores de capacidad del primer prototipo.	31
Ilustración 29: Gráfica de los valores de impedancia del primer prototipo.	31
Ilustración 30: Gráfica de los valores de fase del primer prototipo.	32
Ilustración 31: Geometría del segundo prototipo.....	33
Ilustración 32: Gráfica de los valores de resistencia para el segundo prototipo.....	37
Ilustración 33: Gráfica de los valores de reactancia para el segundo prototipo	38
Ilustración 34: Gráfica de los valores de capacidad para el segundo prototipo	38
Ilustración 35: Gráfica de los valores de impedancia para el segundo prototipo	39
Ilustración 36: Gráfica de los valores de fase para el segundo prototipo	40
Ilustración 37: Evolución valores de resistencia para los diferentes sensores.....	44
Ilustración 38: Evolución valores de reactancia para los diferentes sensores	44
Ilustración 39: Evolución valores de capacidad para los diferentes sensores.....	45
Ilustración 40: Evolución valores de impedancia para los diferentes sensores.....	45
Ilustración 41: Evolución valores de fase para los diferentes sensores	46
Ilustración 42: Valores medios de la R con su desviación	47
Ilustración 43: Valores medios de la Xc con su desviación	48
Ilustración 44: Valores medios de la C con su desviación	49
Ilustración 45: Valores medios de la Z con su desviación	50
Ilustración 46: Valores medios de la Fase con su desviación.....	51
Ilustración 47: Regresión para los valores de capacidad de 25-55% HR	52

Il·lustració 48: Regresió para los valores de capacidad de 60-80% HR	52
Il·lustració 49: Regresió para los valores de la impedancia de 25-65 %HR.....	53
Il·lustració 50: Regresió para los valores de impedancia de 70-80 %HR	53
Il·lustració 51: Regresió para los valores de fase de la impedancia	54

Tabla 1: Valores de impedancia del primer prototipo en seco	22
Tabla 2: Valores de impedancia del primer prototipo en húmedo.....	23
Tabla 3: Valores de impedancia del pp. con escala reducida en seco.....	23
Tabla 4: Valores de impedancia del pp. con escala reducida en húmedo	24
Tabla 5: Valores de impedancia del pp. con reducció de ramas en seco	24
Tabla 6: Valores de impedancia del pp. con reducció de ramas en húmedo	25
Tabla 7: Valores del primer prototipo a 20Hz	27
Tabla 8: Valores del primer prototipo a 200Hz	27
Tabla 9: Valores del primer prototipo a 2000Hz	28
Tabla 10: Valores del primer prototipo a 20000Hz	28
Tabla 11: Valores del primer prototipo a 200000Hz	29
Tabla 12: Valores del segundo prototipo a 20 Hz.....	34
Tabla 13: Valores del segundo prototipo a 200 Hz.....	35
Tabla 14: Valores del segundo prototipo a 2000 Hz.....	35
Tabla 15: Valores del segundo prototipo a 20000 Hz.....	36
Tabla 16: Valores del segundo prototipo a 200000 Hz.....	36
Tabla 17: Valores del sensor S1A a 200 Hz.....	42
Tabla 18: Valores del sensor S1B a 200 Hz.....	42
Tabla 19: Valores del sensor S1C a 200 Hz.....	43
Tabla 20: Valores del sensor S1D a 200 Hz.....	43
Tabla 21: Valores de media y desviación de la R.....	46
Tabla 22: Valores de media y desviación de la Xc	47
Tabla 23: Valores de media y desviación de la C.....	48
Tabla 24: Valores de media y desviación de la Z	49
Tabla 25: Valores de media y desviación de la Fase	50
Tabla 26: Estimación de tiempos	56
Tabla 27: Estimación coste/tiempo personal	57
Tabla 28: Estimación costes instalaciones y materiales	57

1 Objeto

Realizar el estudio de la integración de un sensor en un sustrato textil, describiendo el proceso utilizado, además de analizar los materiales utilizados y los principios de funcionamiento del propio sensor.

2 Alcance

- Búsqueda del estado actual de los sensores textiles.
- Análisis de los diferentes tipos de sensores encontrados y selección de las características más útiles para el estudio.
- Comprensión de la tipología de sensor utilizada y principios eléctricos en los que se basa.
- Descripción y justificación del método utilizado para crear el sensor.
- Observación de los resultados del comportamiento del sensor a distintas humedades relativas.
- Comparativa entre distintos sensores para valorar la reproducibilidad del mismo.

3 Especificaciones

- Concretar el tipo de proceso de integración del sensor.
- En relación al sensor nos centraremos en sensores de humedad de naturaleza capacitiva.
- El sustrato utilizado en todos los casos será un tejido de calada de algodón.
- Obtener valores que sean interpretables por los chips más utilizados en estas aplicaciones, la elección y diseño del circuito de acondicionamiento queda fuera del estudio.
- El sensor podrá realizar más de una medición y no estará limitado a un uso. El estudio de la solidez y consistencia del sensor a los lavados no será contemplado en este estudio.

4 Justificación

Durante el estudio se pretende realizar una recopilación de los diferentes sensores textiles, centrándose en los sensores de humedad, analizarlos y comprender las características más importantes de cada uno de los artículos analizados y descritos. Este estudio se realiza con la finalidad de tener una base sobre la que trabajar y realizar unos primeros pasos en el mundo de los *Smart textiles*. Aprender que están haciendo los demás grupos de investigación, como están integrando los sensores, y realizar el estudio del que más interesante sea, ya sea por sus posibles usos o por los métodos de integración en el sustrato. El estudio nos aportará una visión del mundo de los sensores integrados en la actualidad.

Este estudio puede constituir un documento base para futuras investigaciones e incluso se va a utilizar como introducción a la realización de un doctorado que estará integrado en el proyecto '*Integración de electrónica en un sustrato textil para el desarrollo de tejidos inteligentes (Smart-textiles)*' con la referencia TEC2016-79465-R, financiado por

el Ministerio de Economía y Competitividad. Este proyecto con una duración de 4 años desde el 30/12/2016 hasta 2020 está financiado con una cantidad de 128.260,00€. En este doctorado se pretenderá llegar a un análisis más detallado del funcionamiento del sensor, el estudio de las diferentes variables y como afectan a la medida de capacidad. En el apartado de los parámetros eléctricos del sensor será importante analizar los resultados a diferentes frecuencias para poder encontrar la más adecuada para que el sensor trabaje. Además de todas las posibles aplicaciones que puede tener un sensor de humedad de este tipo dentro del mundo sanitario y deportivo, que son muchas y variadas, la aplicación que se desea implementar y obtener un buen resultado de integración es la monitorización de la sudoración de un deportista durante su entrenamiento. Para ello se deberán estudiar tanto las variables del sensor, como la integración del mismo en un nuevo sustrato, una camiseta de punto, ya sea de algodón o poliéster. En este caso la integración continuará siendo bordada, pero se deberán modificar, si es necesario, algunos parámetros como puede ser la tipología del bordado, para conseguir ese confort y esa flexibilidad que una camiseta de punto debe tener.

Al final del estudio se pretende obtener una visión clara sobre la geometría del sensor a estudiar. Se pretende entender el principio de funcionamiento en el que se basa el sensor y las posibilidades de acondicionamiento con un circuito electrónico capaz de traducir los valores del sensor a valores de humedad de forma eficaz. Esta característica va a ser determinante a la hora de tomar una geometría como válida. Y posteriormente se debería realizar la elección de la tipología del circuito integrado que se utilizará para tomar los valores de impedancia del sensor, y poder acondicionarlos, pero este estudio del circuito ya queda fuera del proyecto, y será realizado en el futuro doctorado del que se ha hablado con anterioridad.

5 Estado del arte

Para realizar el estudio y el posible diseño de un sensor para bioinstrumentación, es necesario llevar a cabo un estudio del estado del arte, con el objetivo de obtener la información necesaria acerca del tema y de cómo se encuentra en estos momentos la tecnología que se va a estudiar.

Este apartado va a centrarse en definir las características más importantes y reseñables de diferentes sensores, para así poder tener una base desde la cual trabajar. A continuación se describirán los diferentes modelos de sensores, basándose en los artículos que se han encontrado y a partir de los cuales se extraerá el diseño del sensor a estudiar. Se prestará atención tanto a la técnica de integración del sensor, el material del sustrato, la naturaleza del sensor utilizado, la propiedad del sensor que varía y permite la medición y el material conductor del cual está hecho el sensor.

El primero de los estudios analizado [1] se centra en la integración de sensores y electrodos para la monitorización de la salud.

La construcción de estos sensores consiste en la introducción de hilos conductores en un tejido, en disposición lineal de forma alternativa con hilos de algodón. Estos tejidos son dispuestos de tal forma que entre los hilos conductores de diferentes capas, se cortan perpendicularmente formando una matriz. Entre estos tejidos se coloca una capa de tejido absorbente, además de colocar también este mismo tejido absorbente entre el tejido sensitivo y la piel o la zona a registrar la humedad.

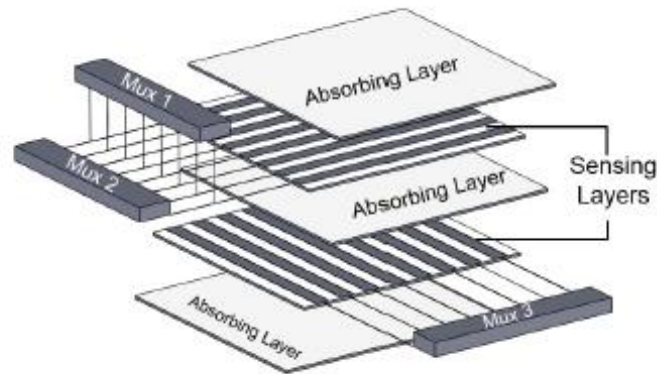


Ilustración 1: Disposición capas del sensor

En este caso para el cálculo de la humedad se realizará la medición de la variación de la resistencia entre las zonas conductoras de diferentes capas o la variación de resistencia entre hilos conductores de la misma capa (sensor resistivo). Para esto será necesario un acondicionamiento de la señal. En este caso se conecta una de las zonas conductoras de la capa superior con otra de las zonas de la capa inferior para realizar el siguiente esquema y de esta forma observar como varia la tensión de entrada con respecto a la tensión de salida.

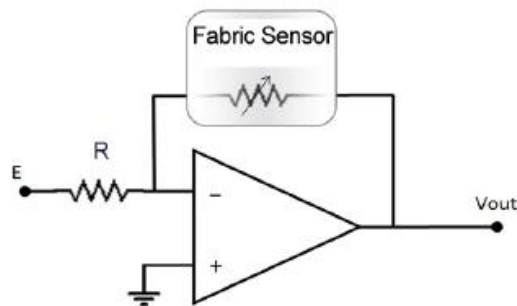
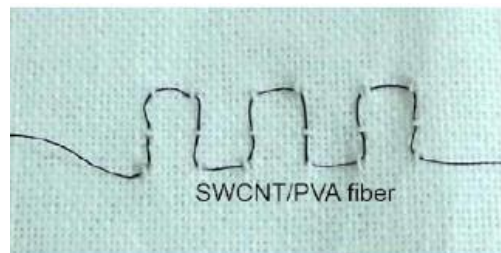


Ilustración 2: Esquema de conexión de acondicionamiento

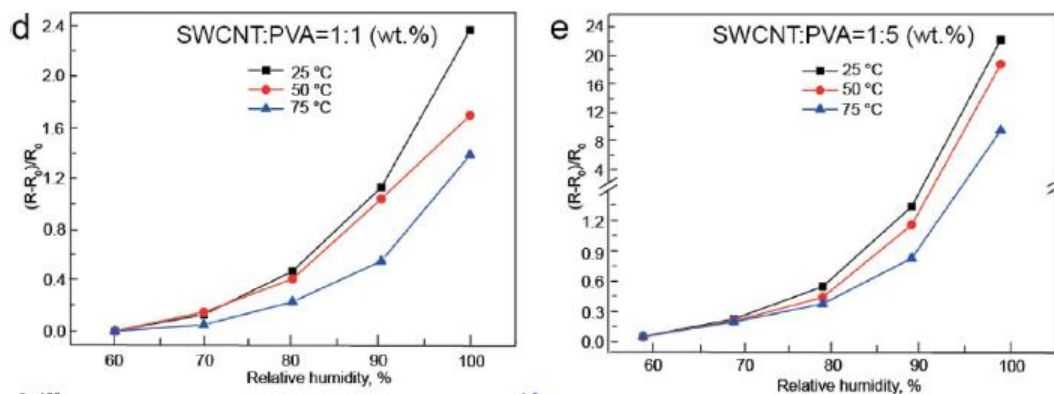
Y a partir de este sistema y las medidas, se podrá obtener un indicativo de la humedad y su distribución. La sensibilidad del sistema se podrá variar en función de la resistencia R del esquema mostrado en la ilustración 2. Con estos valores, y una vez ya se haya realizado la obtención de la regresión del sensor, se podrá dar valores de la humedad detectada por el mismo además de la distribución de la humedad sobre la matriz.

En el segundo de los artículos revisados [2] se realiza un patrón cosido en el tejido con un hilo de fibras de Nanotubos de Carbono (SWCNT) en mezcla con fibras de PVA. Se explica que se realiza un patrón sencillo para centrar el estudio en las variables y cómo reacciona el propio hilo al cambio de humedad.



Il·lustració 3: Hilo de SWCNT/PVA

Se observa en la Ilustración 3 el patrón utilizado. Se han realizado diferentes muestras a diferentes composiciones del hilo. La primera especifica que por cada parte de SWCNT se introduce otra parte igual de PVA. La segunda composición por cada 5 partes de PVA se introduce una parte de SWCNT. En este caso se realiza la medición de la variación de la resistencia del hilo para obtener la humedad relativa que está siendo captada por el sensor.



Il·lustració 4: Gràfica Resistència-Humedat relativa

Además este material se ha probado en condiciones de lavado y de usos, invirtiendo la humedad del ambiente mostrando como resultado una excelente reversibilidad del material en sus usos. En el caso de la Ilustración 4, se observa como el valor que utilizan para realizar la gráfica de relación con la humedad es la resistencia relativa del sensor, calculándola en función de la resistencia inicial del hilo.

El tercero de los artículos [3] aportará ideas en cuanto a la geometría del sensor. En este caso se ha realizado un sensor con material conductor a partir de una tecnología de impresión. La tinta utilizada contiene nano partículas de plata. Al ser una tinta, y no un hilo, se obtienen unos resultados muy buenos al doblado y estirado del sustrato, siempre y cuando no aparezca una línea divisoria en la geometría que separe dos pequeñas partes del sensor dejándolo sin conexión.

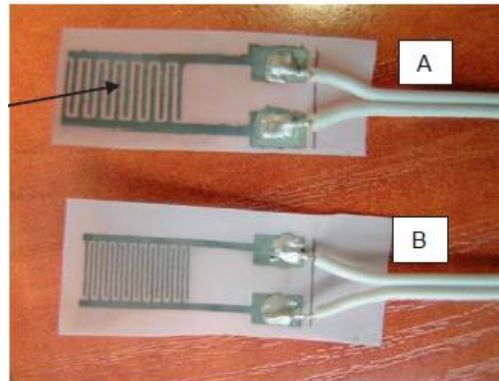


Ilustración 5: Patrón del sensor

Este sensor centra su funcionamiento en la medición de la diferencia de impedancia que existe entre los electrodos, a diferentes humedades relativas, detectando humedades relativas superiores al 60 %. Esto es debido a que el sistema que usan para la toma de medidas de impedancias no permite medir a órdenes de magnitud tan altas, y por lo tanto solo obtienen valores a partir de 60% de humedad relativa.

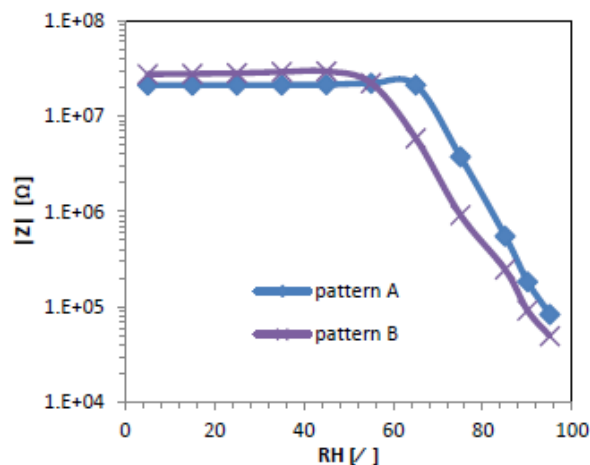
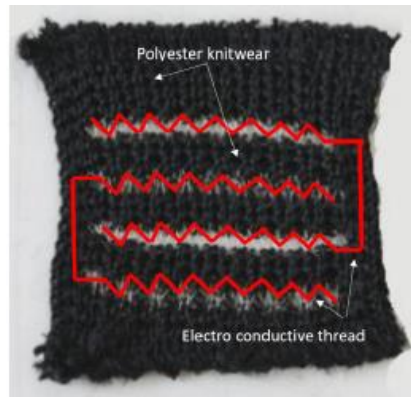


Ilustración 6: Gráfica Impedancia-Humedad relativa

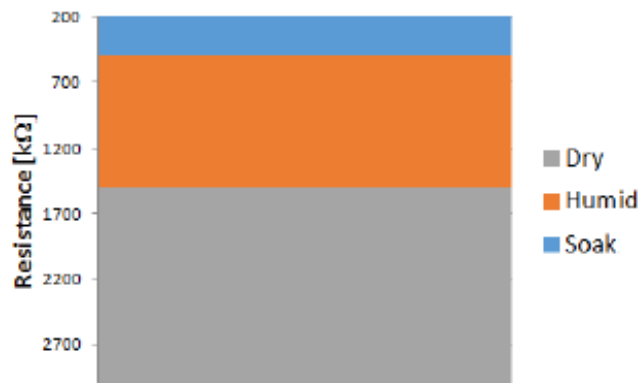
En el caso de este sensor se debe tener en cuenta la estabilidad del mismo a largo plazo, que aun esta por mejorar. Se habla de la solidez de la impresión al lavado, se habla de una mejora cuantitativa y cualitativa con respecto a otros sistemas y tintas, pero que aún queda fuera de los estándares necesarios para poder asegurar que la impresión aguantará un uso diario y sus lavados.

En el cuarto de los artículos [4], se habla sobre un sensor de humedad aplicado a la monitorización de recién nacidos. En el tejido se dispone un patrón interdigital bordado del hilo conductor, el cual está formado por fibras de acero inoxidable, en un tejido de punto de poliéster.



Il·lustració 7: Colocació del patró.

Este sensor proporciona a partir de la resistencia efectiva del mismo, entre los electrodos, unos rangos que nos indican como se encuentra el tejido en ese momento entre tres estados: Seco, húmedo y empapado.



Il·lustració 8: Gràfica de los rangos de sensibilidad del sensor

En este caso no es comprensible como teniendo la geometría que tienen, solo se dedican a medir la resistencia. Al tener una geometría interdigital de 2 ramas, podrían medir la impedancia que se opone al paso de la corriente entre electrodos, de esta forma obtener más información y podrían ser capaces, en el mejor de los casos, de obtener una idea de la humedad relativa. Podrían haber obtenido más información de la que tienen, que se basa simplemente en seco, húmedo y mojado.

En el siguiente artículo [5], no se tiene muy en cuenta el cómo realizan las mediciones o lecturas de la información, pero si parecía interesante el cómo habían trabajado con este sistema. Se realiza un sensor bordado en el tejido a partir de un multifilamento de fibras de plata (SHIELDEX).



Il·lustració 9: Patró bordado con hilo de fibras de plata

La tecnología usada en este caso es UHF RFID (*ultra high frequency radiofrequency identification*). De esta manera se pueden leer los resultados de forma remota. Debido a que el patrón arriba mostrado funciona como una antena.

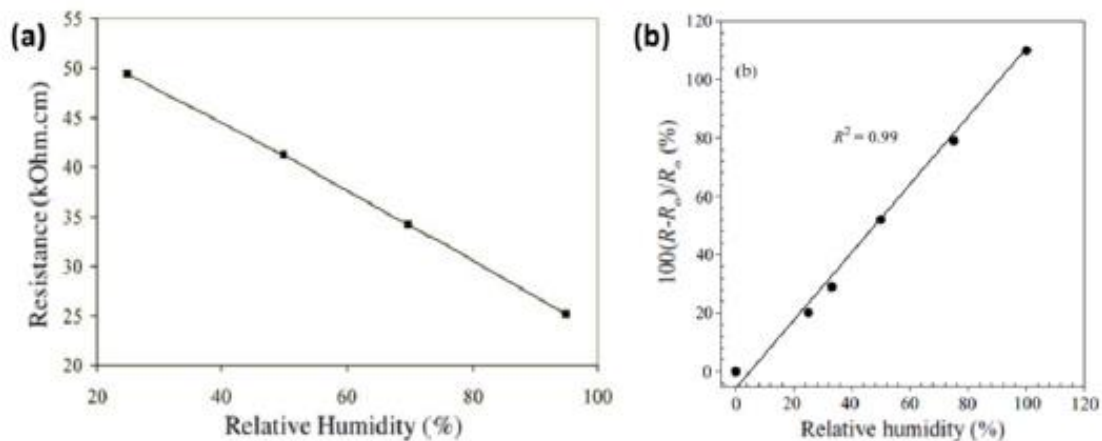
En el caso en cuestión el sistema se basa en la medición de la variación de la impedancia. Los resultados de los test se centran en la determinación de la viabilidad del funcionamiento del sensor y de la captación de los resultados a diferentes distancias entre la antena (sensor) y el sistema de radiofrecuencia. Pero lo interesante es que aquí el sensor actúa como un elemento pasivo, que simplemente responde a las señales que recibe del RFID

En el siguiente artículo [6], se observa una variación en el material usado en la conducción.

En este artículo se expone unos sensores de humedad basados en la diferencia de resistencia del sensor provocada por la variación de la humedad en el tejido. Ya que la variación de esta resistencia podrá ser comprobada por sus efectos en la conductividad del sensor.

Además se expone la posibilidad de utilizar varios materiales como conductores en estos sensores. El más común el acero inoxidable, además de un polímero conductor (PEDOT) en diferentes substratos poliméricos.

A continuación se puede observar dos gráficas de la evolución de la resistencia de unos sensores integrados en un tejido, y en ellos podemos ver cómo puede existir una relación entre la humedad relativa a la que se encuentra el sensor con el valor de la resistencia medida (en este caso se observan sensores realizados con el polímero).



Il·lustració 10: Gràfics de sensors realitzats con PEDOT

Y para finalizar con el repaso del estado actual, se revisa el artículo, [7], se encuentra un sensor realizado con *SilveR.STAT*, un hilo realizado en su mayoría de fibras de plata. Este sensor utiliza la variación de impedancia entre dos electrodos para detectar la variación de humedad. Esta variación tiene su principio en el cambio en la humedad atrapada en el tejido y que modifica su permitividad. A continuación se podrá observar la geometría del sensor donde se podrán diferenciar los dos electrodos.

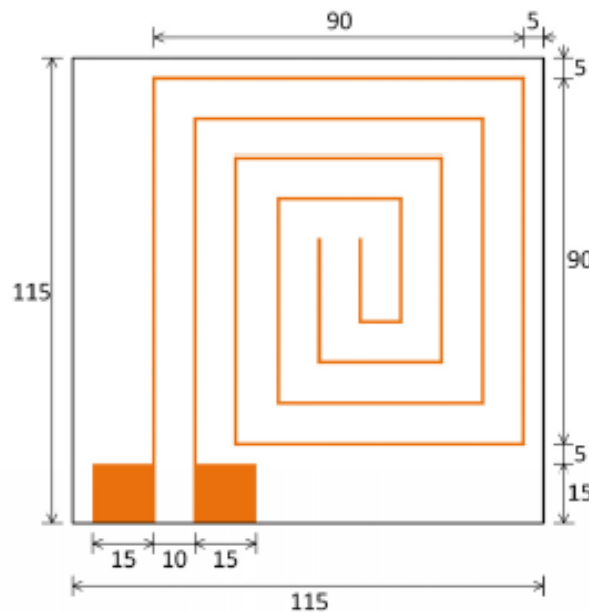


Ilustración 11: Geometría utilizada para el sensor

Y finalmente el artículo muestra que este tipo de sensores son capaces de resistir a algunos ciclos de lavado, y por tanto muestra una característica muy valorada, la reversibilidad. Es decir una vez lavado, volver a realizar las medidas de forma efectiva sin perder capacidades. Esta propiedad será a la larga la que indique el ciclo de vida de los sensores en el futuro y su mayor o menor capacidad de ser reutilizado.

El estado del arte de los sensores se ha orientado al de los sensores de humedad, debido a que este estudio se centrará en esta tipología de sensores. De la información recopilada se han encontrado datos muy interesantes que han promovido un interés mayor en este tipo de sensores y su funcionamiento. Incluso en las capacidades y aplicaciones para las cuales se podrían usar y que aportasen información con el fin de mejorar procesos o situaciones.

6 Diseño del sensor de humedad

Después de haber realizado el estudio de los diferentes sensores, de haber centrado el estudio en el sensor de humedad, que se pueden encontrar en la actualidad y de los medios que se tienen en el laboratorio se decide realizar un sensor de humedad que:

- Se base en dos electrodos, con una disposición interdigital.
- Se medirá la impedancia que se observa entre los dos electrodos para observar el efecto de la humedad relativa sobre este valor.

Para iniciar el camino se debe que elegir entre las dos tipologías de sensor, resistivo o capacitivo. El sensor resistivo es aquel que basa su medición en el cálculo de la resistencia de un conductor, el cual vera modificada su área, su conductividad o su longitud por el parámetro físico que se desea medir. El segundo tipo de sensor, el sensor capacitivo en este caso basa su funcionamiento en la medición de la capacidad del condensador que podrá verse modificada por una variación en el área efectiva del condensador, en el espacio entre las placas del condensador o la variación de la permitividad del medio.

Por el hecho de saber que lo que se quiere medir es el efecto de la humedad en el sensor, el más efectivo, por materiales y técnicas disponibles es el del sensor capacitivo. Que será capaz de interpretar de una forma más efectiva la humedad atrapada en el tejido.

6.1 Materiales

En cuanto a los materiales deberemos diferenciar entre dos zonas, según donde se esté aplicando el material: el sustrato o el sensor.

Para el sustrato se ha elegido un tejido de calada de algodón, más específicamente un tafetán. En este caso el algodón, que es un material higroscópico, debido al proceso de fabricación del hilo, absorberá la humedad del ambiente atrapándola en el interior del hilo y en su superficie. De esta forma facilitará las medidas que se buscan realizar. En el caso de la estructura de tejido elegida permitirá una estabilidad mayor durante las medidas y de esta forma evitar problemas de reproducibilidad. Con esto se desea centrar el foco en el funcionamiento del sensor. Es previsible que en otro nivel de investigación el tejido sea substituido por un tejido de punto de poliéster, como el que usan los deportistas y adaptar el sensor a este campo.

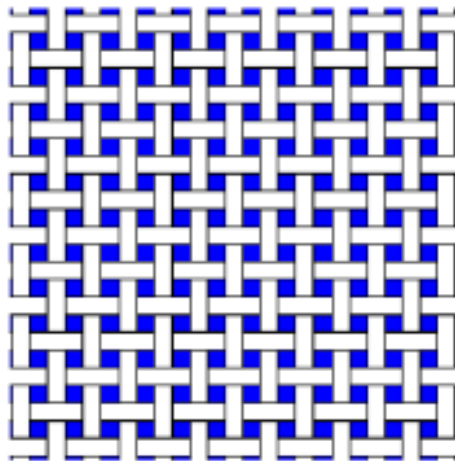


Ilustración 12: Tejido de calada con estructura de tafetán.¹

En cuanto al hilo que se va a utilizar para bordar tendremos dos. Un hilo común de algodón y un hilo conductor, de fibra de nylon 6.6 recubierta de plata. El hilo de plata es un hilo comercializado por la marca Shieldex, como hilo conductor, enfocado a usos de conductividad eléctrica, como evitar cargas estáticas en los tejidos. Con estas fibras se realizan dos multifilamentos con torsión 'Z' y estos son entrelazados entre ellos con una torsión 'S'. Cada uno de los multifilamentos en torsión Z cuenta con una densidad de 117dtex producido con 17 filamentos. Finalmente el hilo contará con una resistencia que podrá ser menor a 30Ω/cm.

¹ Apuntes: José Antonio Tornero; *Hilos, filamentos y telas no tejidas*. Universidad Politécnica de Catalunya, ESIAAT. Master en Ingeniería Textil y Papelera.



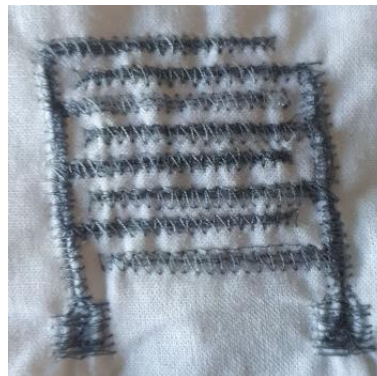
Il·lustració 13. Secció de una fibra de Nylon recubierta de plata².

En la Il·lustració 13 se puede observar una secció transversal de las fibras de las que se ha hablado, donde se aprecia el recubrimiento de plata sobre el filamento de Nylon 6.6. Se aprecia una pequeña superficie más brillante que es la que corresponde a la superficie conductora compuesta en su mayoría por plata

Estos dos hilos se dispondrán en el bordado de forma que el hilo de algodón quedará en la parte superior del bordado y el hilo conductor quedará en la parte inferior del bordado.

6.2 Geometría

En cuanto a la geometría elegida por el sensor, se ha elegido una disposición de electrodos interdigitales. Esta disposición idealmente se comportaría como un condensador de placas paralelas. Pero al tener esta disposición se puede llegar a obtener capacidades mayores con tamaños más pequeños.



Il·lustració 14. Geometría del sensor elegida

Esta geometría permite la variación de varias de sus características para la obtención de diferentes capacidades. Las características que permiten un posible cambio en la capacidad del sensor son: el número de ramas de los electrodos (N), la longitud de las ramas (L) y el tamaño de la base desde donde nacen las ramas (W).

Esta geometría lo que proporciona es la formación de un condensador entre los electrodos, como se ha comentado, el cual a partir del valor de capacidad obtenido a

² Technical Data Sheet *Shieldex Conductive Yarn Silver Plated Nylon 6.6 Yarn 140/17 dtex*. Anexo C

partir de la medición se pretende llegar a relacionarlo con el valor de la humedad a la que está expuesto el sensor. Entre los electrodos, y entre las ramas de diferentes electrodos, la corriente experimentaría el efecto de una impedancia que se opone al paso de la misma, donde el valor predominante debería ser el valor de la reactancia (X_c). Los diferentes valores que debe ser capaz de tener a diferentes frecuencias y humedades, deben dar la capacidad de obtener un buen rango sobre el que trabajar. Además estos valores se verán limitados por el valor máximo que se sea capaz de medir e interpretar.

El espacio entre las ramas de los electrodos está ocupado por el algodón del tejido, el cual intervendrá en la variación de la capacidad entre electrodos al modificar su permitividad ($\epsilon=1.3$). Esta variación de permitividad ocurrirá durante la absorción y deposición de la humedad en el algodón. Y que, posteriormente, permitirá medir y observar la variación de la humedad a través de la variación de la capacidad del condensador de electrodos y, por tanto, de la variación del módulo de la impedancia.

En resumen lo que se obtendrá será el efecto de un circuito que se comportara como un condensador, idealmente. Este condensador se opondrá al paso de la corriente con un valor de Z , del cual el valor de X_c vendrá dado por la ecuación:

$$X_c = \frac{1}{2 * \pi * f * C} \quad (1)$$

De donde f hará referencia a la frecuencia y la C (capacidad del condensador) vendrá dada por la siguiente ecuación:

$$C = \frac{\epsilon A}{d} \quad (2)$$

Donde ϵ será la permitividad del medio, A el área de las placas paralelas y d la distancia entre las placas. De esta forma se tendrá la capacidad equivalente de la geometría, refiriéndose a un condensador teórico, aunque realmente lo que se tenga es un condensador creado entre las ramas de los electrodos interdigitales.

El sensor de estudio, por tanto se comportará como un sensor capacitivo en el cual el parámetro que sufrirá cambios es la permitividad. Esta permitividad, en el caso de estudio, del algodón variara por efecto de la humedad, cambiando el valor del condensador equivalente del circuito, variando por tanto la reactancia y la impedancia del circuito y dando de esta forma una variación en sus propiedades eléctricas a partir de un cambio físico.

En el caso de la geometría real del sensor sería muy interesante ser capaz de controlar la capacidad del mismo realizando variaciones sobre los factores que caracterizan la geometría, de los cuales se ha hablado con anterioridad, para conseguir la variación deseada de capacidad.

En la Ilustración 14, donde se ve un ejemplo de la geometría usada, se aprecian dos electrodos formados cada uno por 4 ramas y el punto de conexión en la parte inferior. Además se aprecia, en este caso, el hilo de algodón que se ha utilizado como base del bordado, mientras que en la parte inferior, en menor cantidad, encontraríamos el hilo conductor. Durante este estudio se ha decidido fijar las variables de la geometría, excepto la longitud, que será utilizada más adelante.

6.3 Diseños

Se pretende que los diseños se realicen en función de las necesidades del propio sensor, es decir, de la necesidad de obtener valores diferentes a anteriores sensores o más adecuados a las necesidades del estudio, como podría ser la capacidad de tener un acondicionamiento del mismo y por tanto que los valores que pueda adquirir el sensor estén dentro de unos rangos que el circuito de acondicionamiento sea capaz de interpretar. Poder traducir los datos a través de una electrónica reducida es tan importante como que el sensor funcione correctamente. Con estas cosas claras se pretende estudiar la funcionalidad del sensor, ver la sensibilidad del mismo, su rango de funcionamiento, la dispersión y la precisión de las medidas.

Inicialmente se tomará un sensor como base, viendo como es capaz de detectar los diferentes grados de humedad y su respuesta a usos repetidos. A partir de este se realizarán una serie de modificaciones para ver cómo se modifican los resultados y poder tomar una decisión. Comprobar si realmente existe variación suficiente en los diferentes sensores que se diseñaran, y a partir de estos, elegir uno para realizar pruebas más exhaustivas. Con estas pruebas se buscará aproximar el tamaño del mismo para obtener los valores de impedancia dentro de un rango deseado donde será capaz de ser interpretado de forma más efectiva y sencilla. Se realiza el diseño mostrado con anterioridad y a partir de este sacamos dos diseños derivados.

6.3.1 Primer prototipo

El primer diseño bordado, la geometría se mantiene a la geometría mostrada anteriormente con 4 ramas. Dos electrodos interdigitales, con un área efectiva del sensor de 35x36 mm, con una longitud de ramas de 30mm y con una longitud de la base del electrodo de 35mm. Además el ancho de las ramas es de 1.5mm aproximadamente y con una distancia entre ramas de 2.5 mm.

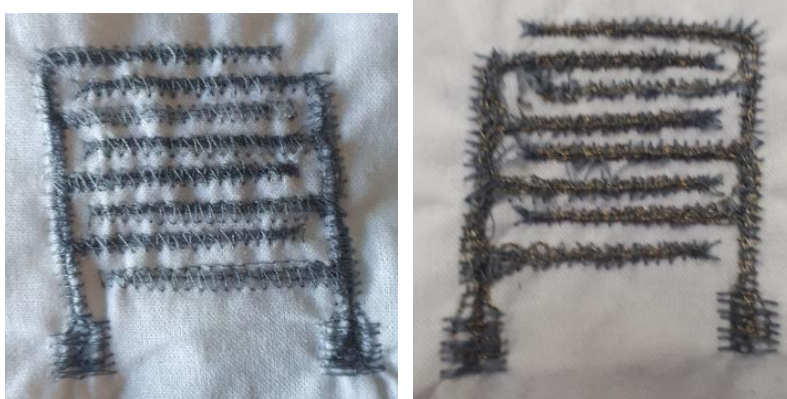
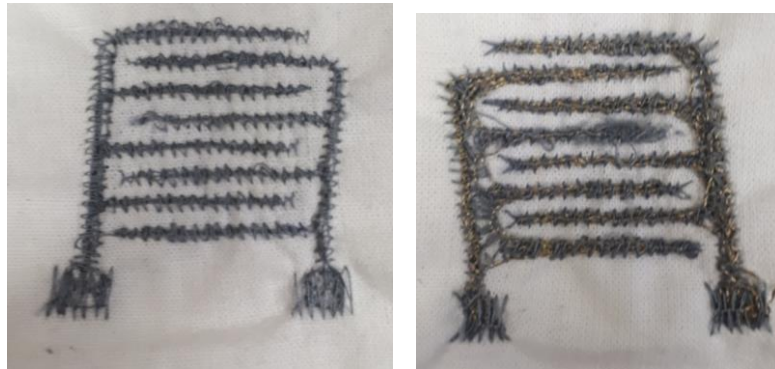


Ilustración 15: Primer prototipo front y reverse

6.3.2 Primer prototipo con escala reducida

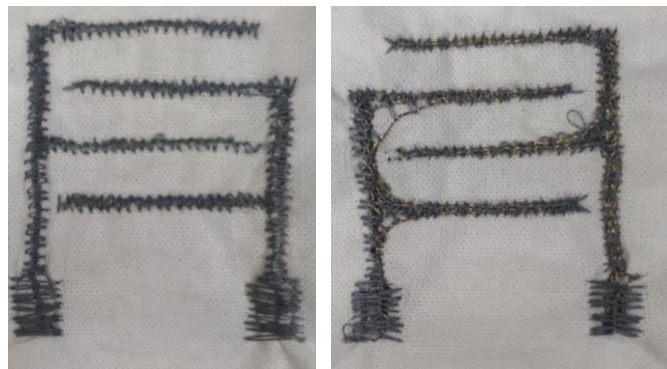
Segundo bordado, la geometría y el número de ramas. Se realiza un escalado del sensor y se obtienen las siguientes medidas. Área efectiva del sensor 27x27mm, una longitud de ramas de 24mm y una longitud de base de electrodo de 27mm. En este caso en la geometría del interior encontramos una distancia entre ramas de 2mm y un ancho de rama de 1mm.



Il·lustració 16: Variació escala front y reverse

6.3.3 Primer prototipo con reducción de ramas

En este último bordado se busca observar el efecto del distanciamiento y reducción del número de ramas a 2. Al tomar las medidas se obtuvieron en área efectiva y base de los electrodos los mismos valores tomados para el sensor 0.1. En cambio para el interior de los electrodos obtenemos una distancia entre ramas de 5mm y un ancho de ramas de 1mm.



Il·lustració 17: Variació número de ramas front y reverse

6.4 Bordado

El bordado del sensor es parte importante de su correcto funcionamiento. Es por ello que el bordado no solo se basará en la posición de los hilos en el tejido, es decir, si tenemos el hilo de algodón arriba y el de plata abajo, como se había comentado anteriormente. Además se deberá estudiar y especificar con que patrón se realiza el bordado de los electrodos. En este estudio se opta, inicialmente, por realizar un bordado de tipo Satín ("Satin stitch type") al cual se deberá configurar la densidad del mismo para obtener el mejor resultado de densidad y efecto en el tejido. Un incorrecto valor de densidad provocará unos espacios en el tejido en la zona intermedia entre bordado y tejido.

Otro tema a considerar del bordado, es la necesidad de tomar un espacio de tiempo entre bordado y medidas, debido a la posibilidad que el roce entre la aguja y el tejido provoque una carga estática en el mismo que introduzca error en la medición.

La densidad del bordado se fijara en 30% después de haber comprobado que la densidad sobretodo afecta al hilo superior de forma más significativa que al hilo inferior. Al no necesitar, el sensor en cuestión, de densidades muy altas en la cara del reverse, una densidad media baja será una muy buena opción además para evitar que el tejido de algodón se habrá en exceso, pudiendo provocar roturas o defectos en los sensores.

7 Metodología experimental.

La metodología que se seguirá quedara dividida en 3 partes: metodología de simulación, metodología de bordado y metodología de toma de medidas.

7.1 Metodología de simulación

Para la simulación se ha elegido un software de simulación de componentes electrónicas de 2-D. En el caso de estudio las dimensiones de altura son tan pequeñas, debido al sustrato textil, que se valoró la opción de tomarlas con menos importancia que el resto y de ahí utilizar este sistema de simulación. Aun así el software sigue teniendo en cuenta la permitividad del sustrato además de su anchura. Los resultados de estas simulaciones nos darán una orientación de los valores que se podrán llegar en la realidad. Debemos tener en cuenta que en el ambiente hay varios factores como humedad, temperatura entre otros que afectaran al sensor.

Por otro lado la precisión de la máquina de bordar y el tipo de bordado también podrán introducir variabilidad, aunque de esto se hablara luego.

Por lo tanto la simulación permitirá que una vez que se haya medido el primer sensor y comparado con su simulación, poder conseguir valores más cercanos a los deseados a partir de la comparación entre simulaciones, que después se verán reflejadas en diferencias similares en la realidad.

El programa utilizado en este caso es el denominado “*Advanced Design System 2014*” en el cual se prepara uncialmente un proyecto donde se definen las características del sustrato, algodón, y del material conductor y su geometría. De esta forma al realizar la simulación obtendremos los resultados más cercanos posibles a la realidad.

7.2 Metodología de bordado

El bordado se realizará con la máquina de coser Singer Future, que se encuentra en el laboratorio de electrónica. El bordado es la técnica elegida para la integración del sensor por que aporta una gran serie de ventajas a un coste/calidad muy bueno. Incluso proporcionará un tacto adecuado ya pensando en el posible caso de que el sensor tenga que estar en contacto, directo o indirecto, con la piel humana.



Il·lustració 18: Màquina para bordar Singer Future

En el bordado se deberán controlar una serie de parámetros, que también afectarán a las diferencias de las que se ha hablado con anterioridad, entre la simulación del sensor y las medidas reales. Estos parámetros inicialmente son la tensión de la tela en el soporte, los hilos utilizados para bordar, el tipo de bordado realizado y la densidad del bordado.



Il·lustració 19: Realización del primer bordado

En la ilustración se puede observar a la máquina de bordar en funcionamiento. Los parámetros de tensión del hilo y de tensión del tejido afectarán a la calidad del bordado. Que esta tensión de la que hablamos sea la correcta se verá reflejada en los hilos del bordado. Si la tensión es demasiado baja los hilos quedarán sueltos y el bordado podrá deshacerse, mientras que si la tensión es demasiado alta, el hilo puede provocar una apertura en el tejido de sustrato, que pueda afectar de una forma directa a la absorción de agua del mismo.

7.3 Metodología de toma de medidas

En este caso se verá que entran en juego dos partes: la cámara climática *DYCOMETAL* y el *Programmable LCR bridge*.

La metodología en la cámara climática, fue elegida de forma que se pudieran obtener suficientes puntos. En la cámara climática se variarán dos factores, la temperatura y la humedad, por ello se eligió mantener la temperatura constante y evitar introducir en el diseño demasiados factores que varíen los resultados. La temperatura se mantendrá a 20 °C. Por otra parte la humedad se eligió variarla en intervalos de 5% HR. De esta manera se podrán obtener puntos suficientes y además evaluar la sensibilidad del sensor a estudio. Por ello en la cámara se fijara la temperatura en 20°C y la humedad inicial en 25% HR. Cada vez que se vaya a empezar un proceso de medida se deberá tener en cuenta que en la mayoría de las situaciones la humedad exterior a la cámara será superior a los 25% HR que se han fijado como inicial, y será por ello que se deberá mantener en ese punto inicial durante un tiempo de 20-30 minutos antes de empezar a tomar las medidas, con el objetivo de asegurarse que el tejido no tiene más humedad que la real del ambiente y que evacue la humedad diferencial del ambiente del laboratorio al de la cámara. Igualmente para cada cambio de humedad, para realizar la medida, se deberá dejar pasar unos minutos prudenciales para que se estabilice el sensor y poder tomar las medidas de forma más segura. Ya que la cámara climática no sube de forma lineal, ni tampoco es que se mantenga a una humedad de forma muy clara, y es por ello que deberemos minimizar los posibles errores que nos puedan derivar del cambio de humedades.



Ilustración 20: Cámara climática

Siguiendo analizando la metodología de toma de medidas, se llega al *Programmable LCR bridge*. Este permitirá adquirir la impedancia equivalente de los electrodos interdigitales que se han bordado. El LCR permitirá obtener los datos en diferentes formatos y a diferentes frecuencias. En el caso de estudio se recopilarán la impedancia en su formato de resistencia más la reactancia, a las frecuencias de 20, 200, 2.000,

20.000 y 200.000 Hz. De esta forma se verá cómo afecta a la impedancia equivalente, el aumento o disminución de la humedad. Este hecho dará lugar a una serie de preguntas como ¿la frecuencia afecta a la sensibilidad de medición de humedad del sensor? Que pueden aclarar la posibilidad de que exista una frecuencia donde el sensor se comporte de una forma diferente o donde se tenga una mayor sensibilidad a la variación de humedad del ambiente.



Ilustración 21: LCR Programmable

Un punto muy importante en la toma de medidas es la reproducibilidad de las condiciones al máximo, es por ello que se utiliza un marco para mantener el tejido tenso a la hora de realizar las medidas del LCR a diferentes humedades. De esta forma estaremos eliminando los posibles efectos de arrugas en la tela de un ciclo de medida a otro.



Ilustración 22: Marco usado para las mediciones

Los procedimientos experimentales que se llevarán a cabo para tomar las medidas, refiriéndose a que medidas y como se van a tomar se irán incrementando. De esta forma inicialmente se realizarán una serie de medidas para comprobar que la idea inicial de que la capacidad del sensor, juntamente a la impedancia del mismo, varíen por el efecto de la humedad. Para ello se hicieron 3 sensores de diferentes tamaños y características, nombrados con anterioridad. Que corresponden al primer prototipo y sus variantes.

Con estos se realiza una prueba simple de medida de seco-mojado. En esta se evaluará el efecto de la humedad en la impedancia medida del sensor y de aquí poder tomar una

decisión sobre si los sensores se ven afectados por la humedad y si es suficiente para poder medir valores intermedios que nos puedan dar una regresión y una visión más próxima acerca de la sensibilidad del sensor. La sensibilidad del sensor será muy importante y una de las características que pueden dar por válida, o no, una geometría de sensor para un uso concreto.

Una vez se comprueba que los sensores se ven afectados de forma drástica por la presencia de humedad en ellos, se plantea y se elabora la metodología para realizar un ciclo completo de medida en la cámara climática. Se realizará a temperatura constante, con saltos de humedad de +5%, con una humedad inicial de 25% RH. Con estos primeros dos ciclos se intentara observar el efecto del tamaño del sensor en los valores de todo el ciclo. De esta forma se podrá diseñar un sensor posterior a estos, el cual tenga unos valores adecuados para ser medidos por electrónicas capaces de ser integradas en la ropa, o en su defecto ser de un tamaño reducido. Estos son los pasos que se han marcado. Después de realizar estos dos métodos y tener una idea del tamaño necesario del sensor, se realizara el siguiente sensor con las medidas oportunas y se realizará otro ciclo de medida completo para su evaluación.

8 Resultados del estudio

8.1 Primer prototipo del sensor de humedad

Una vez se ha repasado todos los puntos del diseño y de la metodología que se va a seguir en la experimentación de este estudio, se dispone a la realización del primer sensor.

En este caso se hablará de los sensores anteriormente expuestos, primer prototipo y sus derivados. Inicialmente se debía conocer si los valores que se iban a medir para determinar la capacidad de funcionamiento del sensor se veían afectados por el efecto de la humedad. Y además ver en el prototipo con la variación en el número de ramas como afectaba, en comparación con los otros sensores, el hecho de tener la mitad de ramas.

Esta prueba se realizó de una forma muy sencilla e intuitiva. Se midieron los 3 sensores a temperatura y humedad ambiente del laboratorio. Decir que además se habían dejado pasar 24h de tiempo entre la medida y el bordado del sensor en el tejido, debido a que cuando se borda el sensor, el efecto de la aguja rozando el tejido es capaz de cargar mínimamente el mismo haciendo las medidas erróneas.

Una vez hecha la medida en estas condiciones, se sumergían los sensores en agua, y se realizaba la misma medida de forma que se obtenían los valores de un hipotético 100% de humedad y así poder evaluar el efecto de la misma.

Tabla 1: Valores de impedancia del primer prototipo en seco

Primer prototipo seco				
f(Hz)	R(Ω)	X(Ω)	Zseco(Ω)	fase(φ)
20	5,00E+08	-6,00E+08	7,81E+08	-0,87
200	5,20E+07	-1,50E+08	1,59E+08	-1,24
2000	4,28E+06	-2,22E+07	2,26E+07	-1,38
20000	-3,95E+05	-3,05E+06	3,08E+06	1,44
200000	-2,04E+04	-3,50E+04	4,05E+04	1,04

Tabla 2: Valores de impedancia del primer prototipo en húmedo

Primer prototipo húmedo				
f(Hz)	R(Ω)	X(Ω)	Zhum(Ω)	fase(ϕ)
20	1,00E+03	-6,20E+01	1,00E+03	-0,06
200	9,28E+02	-3,95E+01	9,29E+02	-0,04
2000	8,80E+02	-2,25E+01	8,80E+02	-0,03
20000	8,70E+02	-2,05E+01	8,70E+02	-0,02
200000	8,37E+02	-1,05E+02	8,44E+02	-0,12

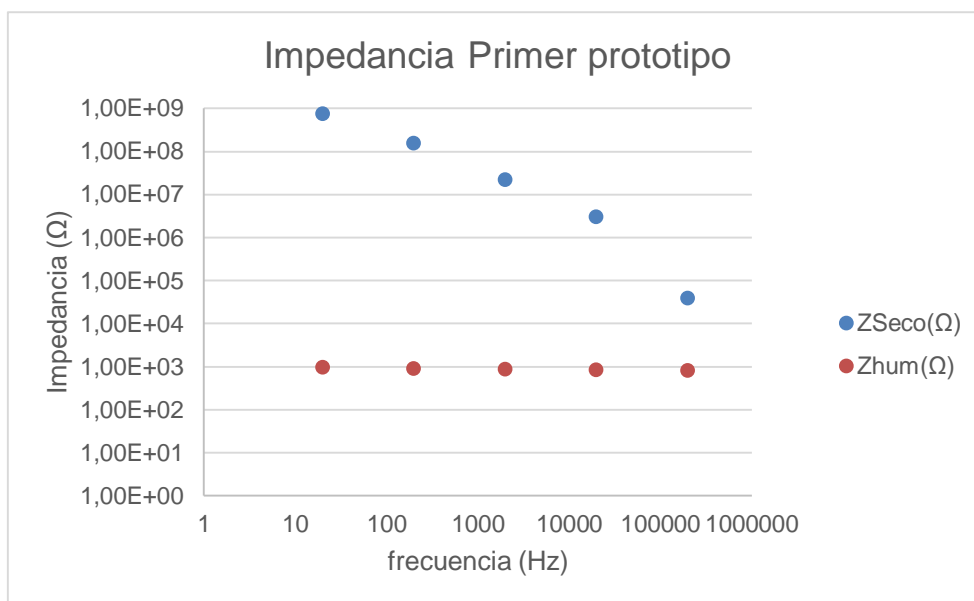


Ilustración 23: Gráfico de las impedancias en seco y húmedo a diferentes frecuencias.

En el primer sensor testeado, ya se puede apreciar la diferencia en la impedancia equivalente del circuito entre los dos estados, seco-húmedo. Esta diferencia es suficiente para poder prever que existirán varios estados dependiendo del grado de humedad. Otro punto a observar, en la Ilustración 23: Gráfico de las impedancias en seco y húmedo a diferentes frecuencias, es la diferencia de los rangos de valores entre seco-mojado dependiendo de la frecuencia a la que ha sido medida.

Tabla 3: Valores de impedancia del pp. con escala reducida en seco

Pp. con escala reducida seco				
f(Hz)	R(Ω)	X(Ω)	Zseco(Ω)	fase(ϕ)
20	6,20E+08	-9,00E+08	1,09E+09	-0,97
200	4,78E+08	-1,90E+08	5,14E+08	-0,38
2000	-7,86E+05	-2,43E+07	2,43E+07	1,54
20000	-1,16E+06	-9,12E+05	1,48E+06	0,67
200000	-1,74E+04	-9,80E+03	2,00E+04	0,51

Tabla 4: Valores de impedancia del pp. con escala reducida en húmedo

Pp. con escala reducido húmedo				
f(Hz)	R(Ω)	X(Ω)	Zhum(Ω)	fase(ϕ)
20	2,52E+03	-1,34E+02	2,52E+03	-5,31E-02
200	2,47E+03	-7,30E+01	2,47E+03	-2,95E-02
2000	2,45E+03	-3,43E+01	2,45E+03	-1,40E-02
20000	2,45E+03	-3,79E+01	2,45E+03	-1,55E-02
200000	2,34E+03	-1,10E+02	2,34E+03	-4,68E-02

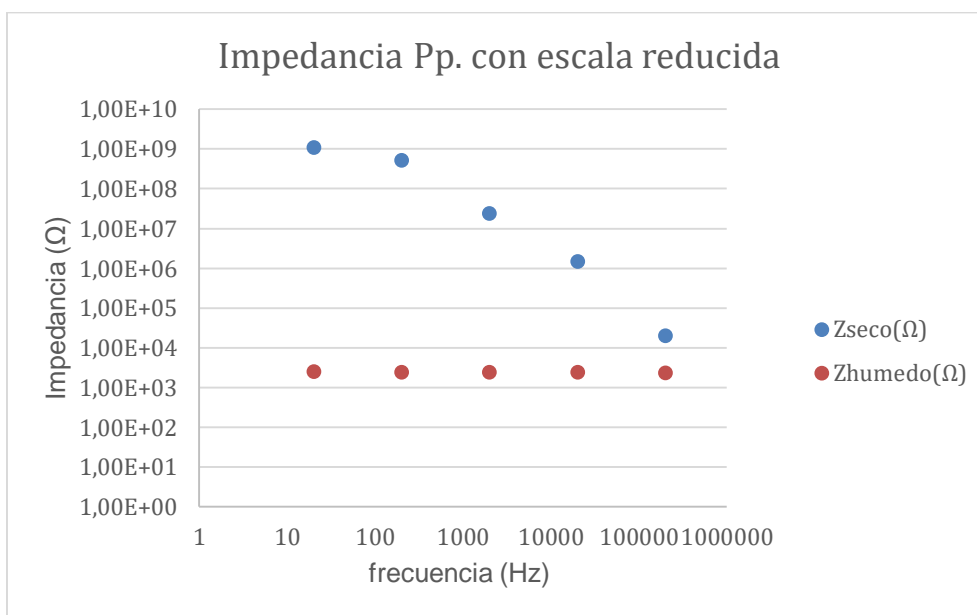


Ilustración 24: Gráfico de las impedancias en seco y húmedo a diferentes frecuencias del sensor 0.1

En el siguiente sensor, los resultados son similares al anterior en lo que a diferencia en los valores entre seco y húmedo, incluso en los rangos existentes en las diferentes frecuencias. Pero si nos fijamos en los valores vemos que son ligeramente superiores al primer prototipo. Es necesario recordar que el pp. con escala reducida es un sensor similar al primer prototipo pero con las dimensiones reducidas. Esto podría indicar que el tamaño aumenta los valores de impedancia.

Tabla 5: Valores de impedancia del pp. con reducción de ramas en seco

Pp. con reducción de ramas seco				
f(Hz)	R(Ω)	X(Ω)	Zseco(Ω)	fase(ϕ)
20	8,30E+08	-8,25E+08	1,17E+09	-0,78
200	1,04E+08	-2,52E+08	2,73E+08	-1,18
2000	5,50E+06	-3,72E+07	3,76E+07	-1,42
20000	2,60E+05	-4,15E+06	4,16E+06	-1,51
200000	1,00E+05	-1,27E+05	1,62E+05	-0,90

Tabla 6: Valores de impedancia del pp. con reducción de ramas en húmedo

Pp. con reducción de ramas húmedo				
f(Hz)	R(Ω)	X(Ω)	Zhum(Ω)	fase(ϕ)
20	1,31E+03	-1,02E+02	1,31E+03	-0,08
200	1,23E+03	-3,80E+01	1,23E+03	-0,03
2000	1,19E+03	-1,60E+01	1,19E+03	-0,01
20000	1,16E+03	1,70E+01	1,16E+03	0,01
200000	1,16E+03	2,40E+02	1,18E+03	0,20

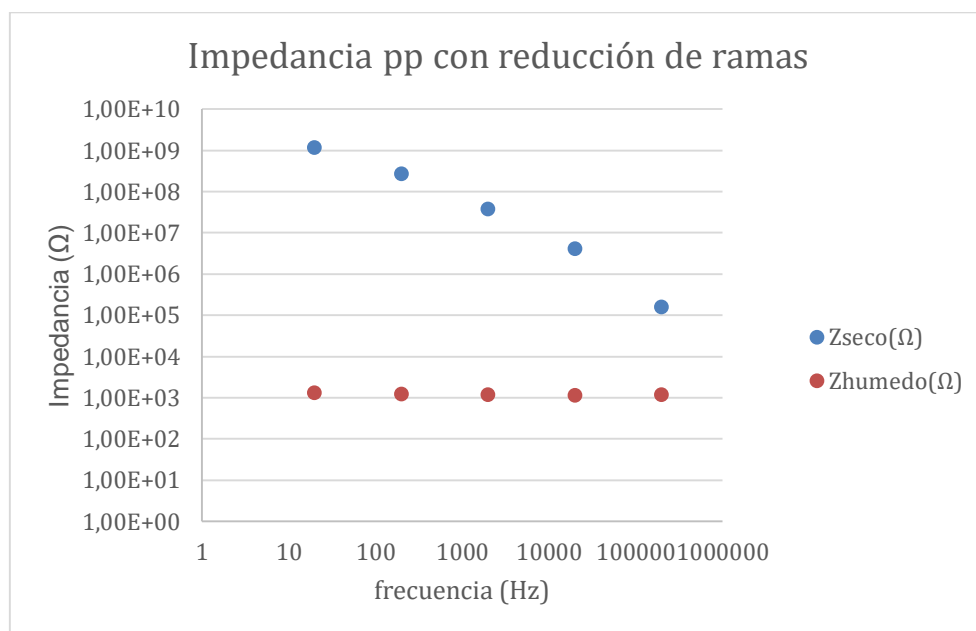


Ilustración 25: Gráfico de las impedancias en seco y húmedo a diferentes frecuencias.

En este sensor se esperaba tener resultados similares a los anteriores y fue lo que se obtuvo. Por otra parte, este sensor fue bordado con el objetivo de observar el efecto de las ramas en los valores de impedancias. Aunque en algunos casos se observan algunas diferencias, la única conclusión o repetición de un fenómeno fue en la resistencia en húmedo. En esta se puede observar una relación los sensores con modificaciones. La resistencia disminuye a un valor cercano a la mitad del sensor anterior, que es un valor característico de este en cuanto al número de ramas que tiene en relación al anterior. Esta variación de resistencia es directa en la variación de sus impedancias, debido a que a grados altos de humedad en el tejido, la parte imaginaria de la impedancia pasa a ser menos importante en relación a la resistencia.

También observando los valores entre los diferentes sensores, se puede ver que para disminuciones en la escala del sensor o en el tamaño, se obtienen aumentos, aunque sean poco significativos en estos casos, de impedancia.

De esta prueba tan sencilla se extrajeron algunas conclusiones, entre las cuales fue la diferencia de valores que se obtuvieron, y la diferencia de rangos de los mismos a diferentes frecuencias en estas condiciones. Esto hizo plantear la posibilidad de la

existencia de una frecuencia determinada donde el sensor funcionaria mejor, debido a tener un rango mayor donde buscar una regresión.

Complementando esta conclusión, también se observó la gran variabilidad que existía en los valores desde la humedad ambiente a mojado y que dio pie al planteamiento de una experimentación más exhaustiva y la posibilidad de evaluar la curva que se obtendría de la variación de la impedancia a diferentes saltos de humedad relativa.

A partir de este punto se prepara el primer prototipo para proceder a las pruebas de un ciclo completo de humedad. Los objetivos de estas pruebas serán:

- Observar los valores de impedancia que se obtengan de los electrodos.
- Extraer una relación entre humedad e impedancia del sensor
- Ver que estos valores de impedancia pueden ser interpretados por algún circuito electrónico y de esta forma poder traducirlos a humedad relativa

Una vez claros los objetivos de esta parte del estudio se procede a preparar la metodología, ya explicada con anterioridad. El tejido será introducido en la cámara climática. Además se deberá tomar la precaución de preparar el tejido de tal forma que el sensor quede tenso, para asegurarnos que para cada sensor en lo que respecta a tensión estaremos en las mismas condiciones. Se dispondrá el tejido en un molde que será capaz de mantener el tejido tenso y facilitara la conexión de las pinzas de precisión del aparato de medida, LCR. La cámara dispone de un orificio lateral por el cual introducir los cables necesarios para medir. El tejido se dispondrá en la bandeja central de la cámara climática, asegurándonos así que campara la humedad del ambiente. Se fijaran las condiciones expuestas anteriormente de 20°C y 25% de humedad relativa que serán los valores iniciales.

En este test haremos una toma de medidas de 25 a 75% de humedad, debido a que el ciclo completo necesita de un gran periodo de tiempo para realizarse y debemos tener en cuenta que este test está enfocado a los objetivos expuestos y que puede concluir en la necesidad de realizar un sensor de un tamaño diferente a los que se han testado hasta el momento. Como la humedad del laboratorio no es controlada, se toma como precaución el mantener a las condiciones elegidas el tejido entre 10-20 minutos para poder tener así una medida segura.

De los valores de resistencia y de reactancia obtenidos se obtendrán los valores de módulo de la impedancia, valor real del condensador aparente y la fase de la impedancia. Estos valores nos permitirán estudiar el efecto de la humedad sobre ellos y sobre el sensor. Con los valores de resistencia y reactancia se obtendrán los demás a partir de las ecuaciones que se muestran a continuación:

$$C = \frac{1}{2 * \pi * f * X_c} \quad (1)$$

$$|Z| = \sqrt{R^2 + X_c^2} \quad (3)$$

$$\theta = \text{atan}\left(\frac{X_c}{R}\right) \quad (4)$$

Y con estas se obtendrán los valores que completarán las tablas mostradas a continuación. Las cuales se realizaran para las frecuencias de 20, 200, 2000, 20000 y 200000Hz. Se espera que el comportamiento del sensor y el efecto de la humedad sobre el varíe de forma diferente en cada una de las frecuencias a las que se realizarán las mediciones. Es por ello que también se desea identificar la frecuencia a la cual sería más viable la toma de datos para el uso del sensor.

Tabla 7: Valores del primer prototipo a 20Hz

Hz	20				
Humedad (%)	R(Ω)	X(Ω)	C(F)	Z(Ω)	fase($^{\circ}$)
25	7,70E+08	-7,85E+08	1,01E-11	1,10E+09	-45,55
30	5,40E+08	-4,40E+08	1,81E-11	6,97E+08	-39,17
35	3,50E+08	-2,54E+08	3,13E-11	4,32E+08	-35,97
40	2,40E+08	-1,69E+08	4,72E-11	2,93E+08	-35,09
45	1,75E+08	-1,25E+08	6,37E-11	2,15E+08	-35,54
50	1,24E+08	-8,63E+07	9,22E-11	1,51E+08	-34,84
55	8,61E+07	-5,70E+07	1,40E-10	1,03E+08	-33,51
60	3,06E+07	-1,40E+07	5,67E-10	3,37E+07	-24,65
65	1,93E+07	-6,60E+06	1,21E-09	2,04E+07	-18,88
70	1,16E+07	-3,31E+06	2,40E-09	1,21E+07	-15,93
75	1,90E+06	-4,86E+05	1,64E-08	1,96E+06	-14,35

Tabla 8: Valores del primer prototipo a 200Hz

Hz	200				
Humedad (%)	R(Ω)	X(Ω)	C(F)	Z(Ω)	fase($^{\circ}$)
25	9,01E+07	-2,29E+08	3,47E-12	2,46E+08	-68,52
30	9,40E+07	-1,74E+08	4,57E-12	1,98E+08	-61,62
35	8,75E+07	-1,22E+08	6,55E-12	1,50E+08	-54,24
40	7,62E+07	-8,50E+07	9,36E-12	1,14E+08	-48,12
45	6,43E+07	-6,07E+07	1,31E-11	8,84E+07	-43,35
50	4,80E+07	-3,70E+07	2,15E-11	6,06E+07	-37,63
55	3,44E+07	-2,40E+07	3,32E-11	4,19E+07	-34,90
60	1,32E+07	-8,35E+06	9,53E-11	1,56E+07	-32,38
65	9,80E+06	-5,71E+06	1,39E-10	1,13E+07	-30,23
70	7,19E+06	-3,32E+06	2,40E-10	7,92E+06	-24,79
75	1,56E+06	-3,43E+05	2,32E-09	1,60E+06	-12,40

Tabla 9: Valores del primer prototipo a 2000Hz

Hz	2000				
Humedad (%)	R(Ω)	X(Ω)	C(F)	Z(Ω)	fase($^\circ$)
25	9,56E+06	-3,35E+07	2,38E-12	3,48E+07	-74,07
30	1,00E+07	-2,96E+07	2,69E-12	3,12E+07	-71,33
35	1,09E+07	-2,54E+07	3,13E-12	2,76E+07	-66,77
40	1,12E+07	-2,19E+07	3,64E-12	2,46E+07	-62,89
45	1,12E+07	-1,84E+07	4,32E-12	2,15E+07	-58,72
50	1,06E+07	-1,38E+07	5,78E-12	1,74E+07	-52,41
55	9,70E+06	-1,05E+07	7,62E-12	1,43E+07	-47,13
60	5,68E+06	-3,71E+06	2,14E-11	6,78E+06	-33,15
65	4,68E+06	-2,23E+06	3,57E-11	5,18E+06	-25,48
70	3,39E+06	-1,74E+06	4,57E-11	3,81E+06	-27,17
75	1,12E+06	-2,08E+05	3,83E-10	1,14E+06	-10,52

Tabla 10: Valores del primer prototipo a 20000Hz

Hz	20000				
Humedad (%)	R(Ω)	X(Ω)	C(F)	Z(Ω)	fase($^\circ$)
25	4,42E+06	-5,50E+06	1,45E-12	7,06E+06	-51,21
30	4,38E+06	-5,10E+06	1,56E-12	6,72E+06	-49,34
35	4,31E+06	-4,66E+06	1,71E-12	6,35E+06	-47,23
40	4,25E+06	-4,30E+06	1,85E-12	6,05E+06	-45,34
45	4,14E+06	-3,82E+06	2,08E-12	5,63E+06	-42,70
50	3,98E+06	-3,30E+06	2,41E-12	5,17E+06	-39,66
55	3,80E+06	-2,75E+06	2,89E-12	4,69E+06	-35,89
60	3,03E+06	-1,37E+06	5,81E-12	3,33E+06	-24,33
65	2,68E+06	-9,00E+05	8,84E-12	2,83E+06	-18,56
70	2,30E+06	-6,30E+05	1,26E-11	2,38E+06	-15,32
75	1,32E+06	3,47E+05	2,29E-11	1,36E+06	14,73

Tabla 11: Valores del primer prototipo a 200000Hz

Hz	200000				
Humedad (%)	R(Ω)	X(Ω)	C(F)	Z(Ω)	fase($^\circ$)
25	-6,42E+03	-6,90E+04	1,15E-11	6,93E+04	84,68
30	-6,30E+03	-6,90E+04	1,15E-11	6,93E+04	84,78
35	-6,25E+03	-6,90E+04	1,15E-11	6,93E+04	84,82
40	-6,00E+03	-6,90E+04	1,15E-11	6,93E+04	85,03
45	-5,70E+03	-7,06E+04	1,13E-11	7,08E+04	85,38
50	-5,39E+03	-7,13E+04	1,12E-11	7,15E+04	85,68
55	-4,80E+03	-7,10E+04	1,12E-11	7,12E+04	86,13
60	-2,75E+03	-7,33E+04	1,09E-11	7,33E+04	87,85
65	-1,77E+03	-7,37E+04	1,08E-11	7,37E+04	88,62
70	-4,00E+02	-7,46E+04	1,07E-11	7,46E+04	89,69
75	7,40E+03	-8,63E+04	9,22E-12	8,66E+04	-85,10

En estas tablas se muestran los resultados de la experimentación, además de los cálculos realizados con las ecuaciones de la (1), (3) y (4) presentadas con anterioridad. Los datos mostrados pueden demostrar el funcionamiento del sensor, permitirán observar si los valores son adecuados para extraer una relación y de esta forma poder tener un sensor totalmente funcional. Para proporcionar una visión más adecuada, de los valores se presentaran a continuación las gráficas para cada factor del sensor a diferentes frecuencias de medida.

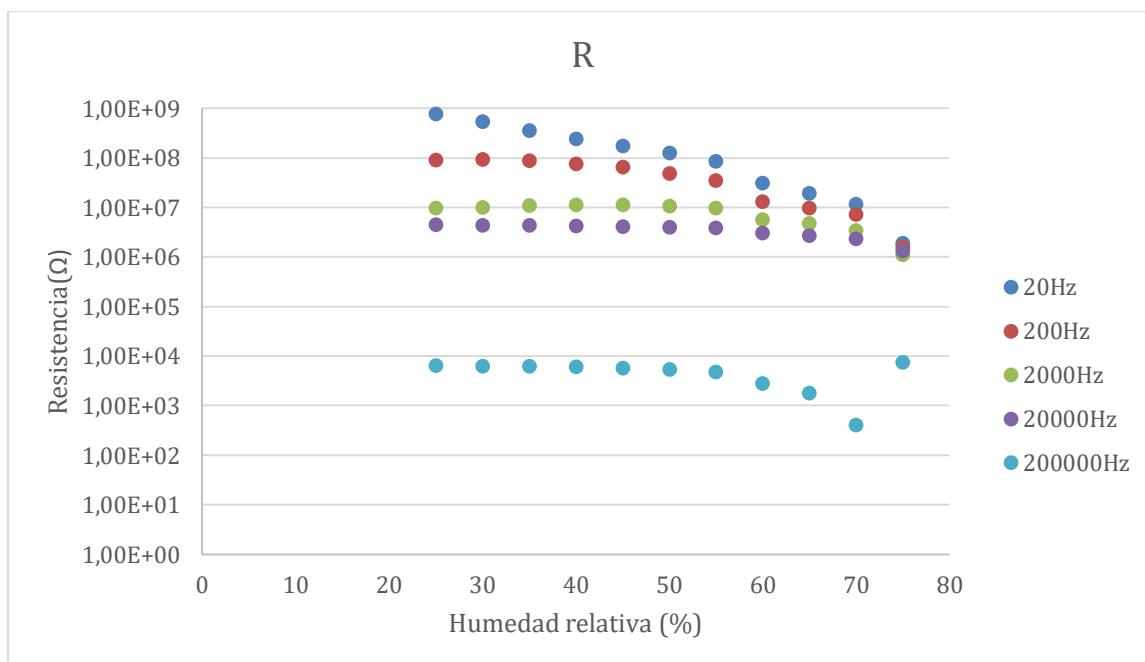


Ilustración 26: Gráfica de los valores de resistencia del primer prototipo.

En esta primera se muestran representados los valores de resistencia, se observa una tendencia, que está más marcada en las frecuencias menores, y sobretodo, unos rangos aptos para poder tener cierta sensibilidad en el sensor. El único inconveniente es la escala a la que se debería trabajar. Puede indicar una necesidad de conseguir una tendencia similar con valores menores. Aunque la resistencia no varía en exceso con la humedad en frecuencias altas, en frecuencias bajas si existe una gran variabilidad. Este hecho restringiría la medida a frecuencias bajas. La resistencia, de todas formas, no es el valor más característico, ni sobre el cual se espera trabajar del sensor y por tanto es menos representativo de los test.

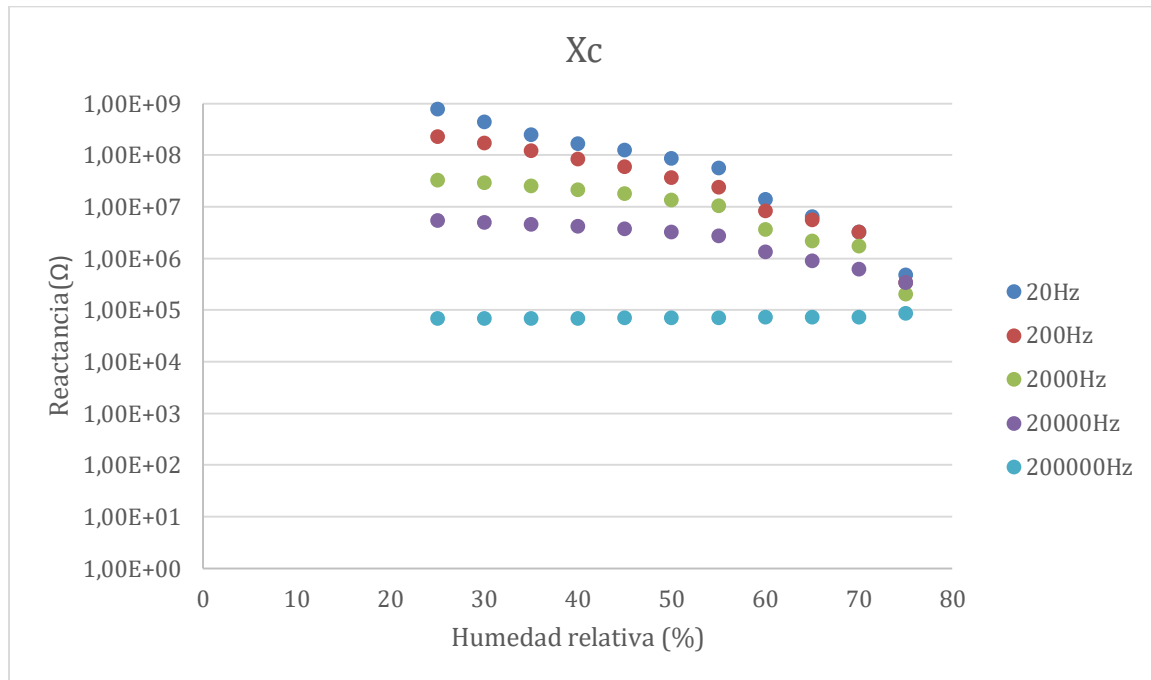
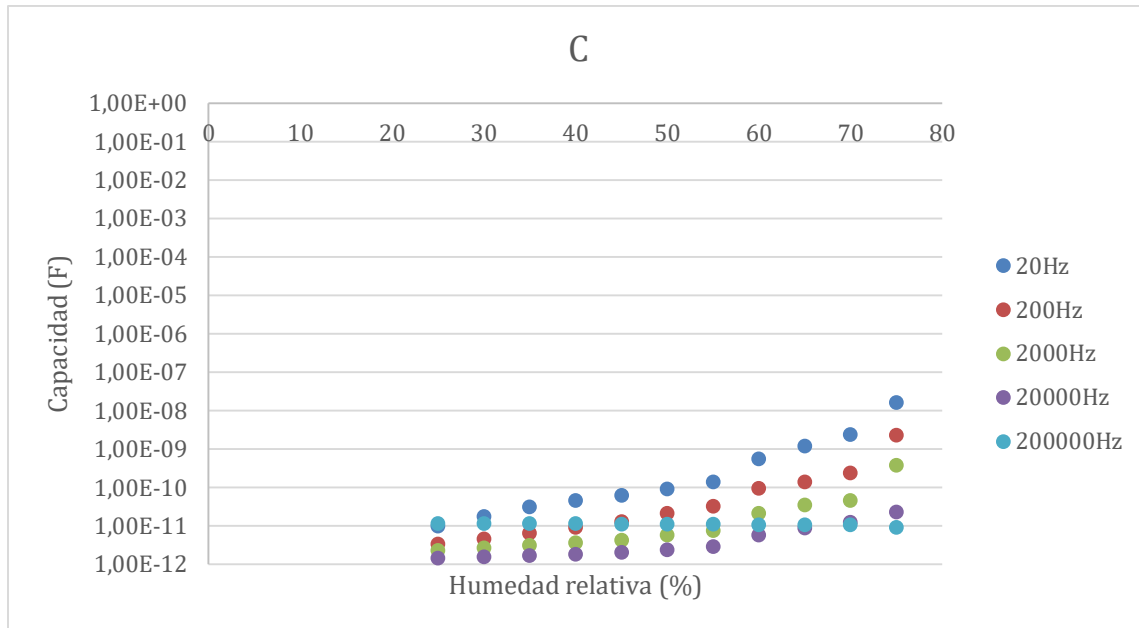


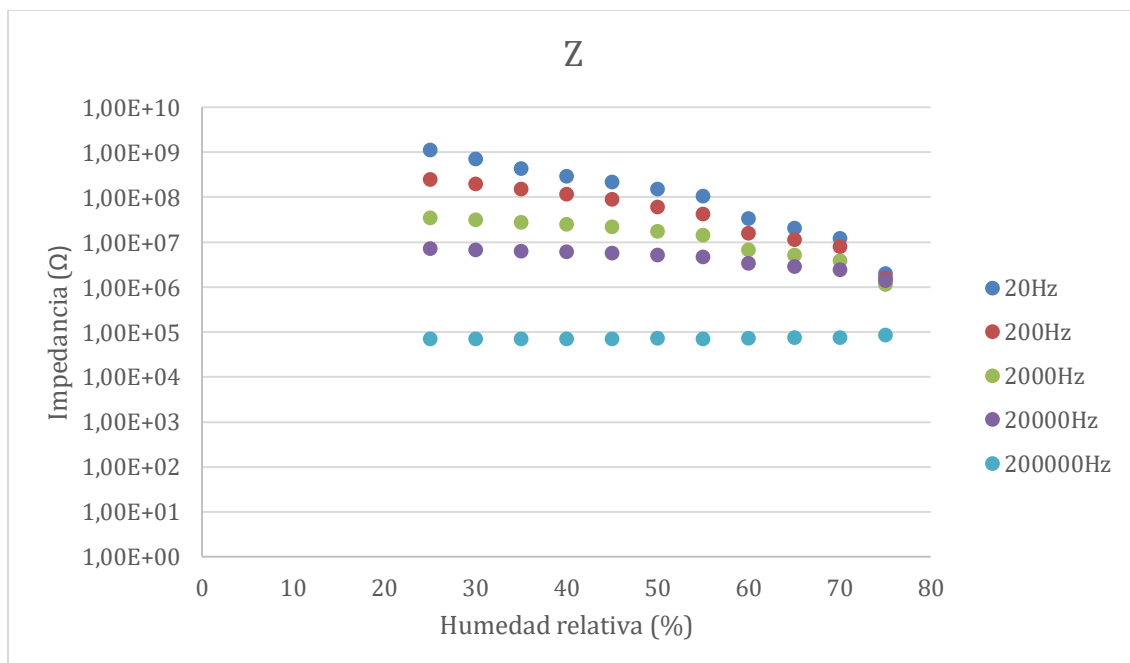
Ilustración 27: Gráfica de los valores de reactancia del primer prototipo.

En la siguiente gráfica mostrada, se observa la reactancia (X_c) del primer prototipo. Este factor tiene un interés mayor, ya que es el factor que proviene de la naturaleza de la geometría de electrodos interdigitales. Este factor se tratará desde este punto de vista como posteriormente, desde el valor real de la capacidad del condensador equivalente. Se puede observar que en la mayoría de las frecuencias la reactancia sigue una tendencia decreciente en función del aumento de la humedad. Esto es debido a que la humedad modifica la permitividad del algodón, que forma el tejido.



Il·lustració 28: Gràfica de los valores de capacidad del primer prototipo.

De los valores anteriores de reactancia mediante la ecuación (1) se pasa a valores de capacidad. Este paso se ha realizado para ser conscientes de la posibilidad de este sensor de ser medido, y que acondicionamiento sería necesario para ello. Se tiene en cuenta de esta forma, la posibilidad de que el sensor sea “wearable”, es decir, que tanto sensor como acondicionamiento puedan disponerse en la tela o en alguna disposición portable.



Il·lustració 29: Gràfica de los valores de impedancia del primer prototipo.

Con la ecuación (3) y los valores obtenidos de resistencia y reactancia se obtiene el valor de la impedancia. Buscando el comportamiento como conjunto del sensor.

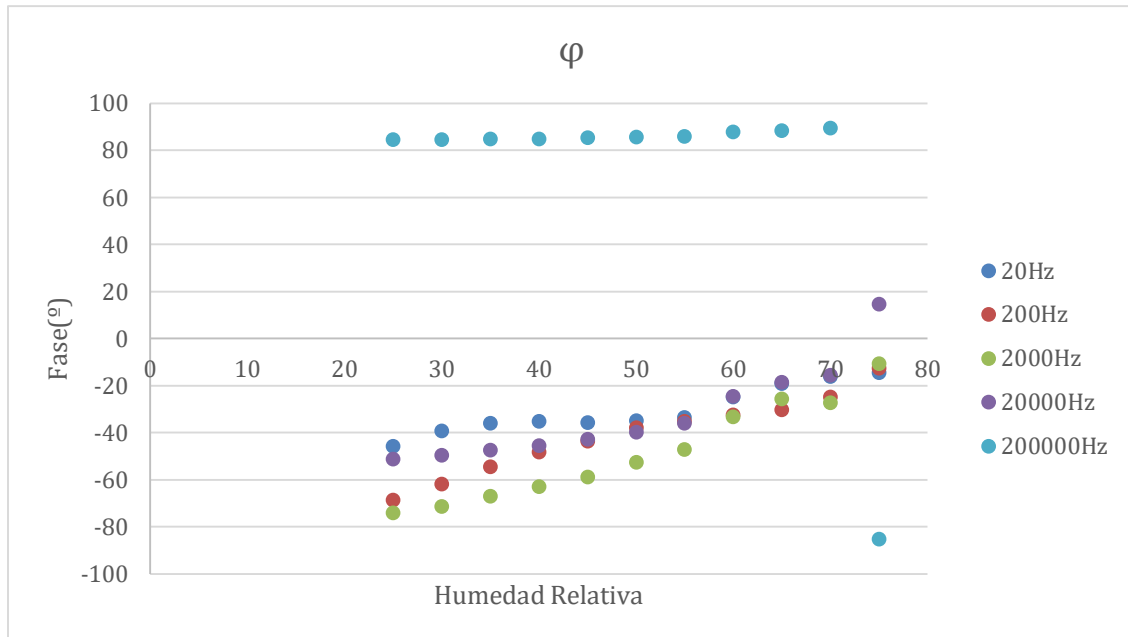


Ilustración 30: Gráfica de los valores de fase del primer prototipo.

Y finalmente la fase, que nos muestra la naturaleza capacitiva en la mayoría de los casos. La excepción resulta en los 200kHz, a este valor como se ve además en las otras graficas el comportamiento del sensor es estable, y se comporta en la mayoría de estados de humedad como un sistema resistencia-bobina.

Finalmente, teniendo en cuenta todos los datos, se llega a la conclusión de que el sensor es viable, en el aspecto de rango entre los valores y capacidad de medición. El inconveniente son los valores, que en orden de magnitud, se escapan ligeramente de los valores que resultarían fácilmente interpretables por electrónica aplicable al uso final de este sensor. Este hecho da pie a la necesidad de disminuir los resultados. Para ello se deberá modificar las características del sensor, en este caso el tamaño del mismo. Para ello se deberá saber en qué medida modifica cada uno de los parámetros la capacidad.

Por la necesidad de realizar en posteriores estudios un circuito de acondicionamiento, se pone como objetivo conseguir unos valores de impedancia del sensor que alguno de los circuitos integrados más comunes para medición de impedancia sea capaz de medir el valor del sensor. Es por ello que se decide tomar como objetivo el circuito integrado AD5933. Este circuito integrado es capaz de realizar medidas hasta 10 MΩ de impedancia y 100kHz. Podremos encontrar su *data sheet* con más información en el Anexo C. En el caso del primer prototipo se están obteniendo valores muy superiores de impedancia, y es por ello que se va a realizar un cambio en la geometría para llegar a tener valores de impedancia menores y que sean asequibles de poder adecuar por parte de un circuito de medida. En el caso de este se intentará que el valor máximo de impedancia que pueda adquirir el sensor en alguna de las frecuencias de medida sea la máxima admisible por el circuito integrado.

8.2 Segundo prototipo del sensor de humedad.

Una vez se ha llegado a la conclusión del apartado anterior donde se ha comprobado que el sensor es sensible a cambios de humedad, con la geometría elegida, en este punto se necesita conseguir disminuir los valores obtenidos de reactancias, y por tanto de valor efectivo del condensador.

Para ello se analiza la fórmula que permite calcular la capacidad del sistema creado por los electrodos interdigitales[8]:

$$C(\text{interdigital})(pF) = \frac{\epsilon_{re} * 10^{-3}}{18\pi} * \frac{K(k)}{K'(k)} * (n - 1) * \frac{L}{1 * 10^{-6}m} \quad (5)$$

Los factores que intervienen de forma directa en el valor de la capacidad son los mismos de los que se habló al inicio de este documento siendo:

- N: nombre de ramas en los electrodos
- L: longitud de las ramas
- W: ancho de las ramas
- S: espacio entre ramas
- ϵ_{re} : permitividad relativa efectiva
- K y K': integrales elípticas definidas
- k: argumento de las integrales elípticas definidas.

De estos factores, y además de los que podemos controlar, el que varía de forma directa la capacidad del sistema es la longitud de las ramas. Con este conseguiremos el efecto deseado en relación directa con la reactancia. Al estar presenta en la formula multiplicando tendrá un efecto proporcional frente a la capacidad, o al menos de forma teórica.

Se toma la decisión de disminuir el valor de la reactancia esperada para poderla acercar al rango de valores interpretables por el AD5933. Por tanto se diseña el segundo prototipo tomando como referencia el primer sensor. El segundo prototipo tendrá las dimensiones de ancho de ramas y de tamaño de la base del electrodo iguales que en el primer sensor. El único factor que tendrá un cambio significativo será el valor de la longitud de las ramas, que pasarán a ser de 72 mm.



Ilustración 31: Geometría del segundo prototipo

En la simulación del mismo se obtienen valores casi 3 veces menores y por tanto, se decide realizar las mediciones del mismo. En este caso como ya se ha comprobado que la geometría permite al sensor captar cambios de humedad, se procederá a realizar un proceso completo de medida, desde 25 hasta 95% de humedad relativa. Aun así antes de mostrar los resultados y presentarlos, cabe remarcar que en ocasiones la cámara climática puede presentar irregularidades, haciendo que cuando marques una humedad esta no evolucione de forma lineal, si no que oscila hasta llegar al valor fijado. Se esperan valores menores de impedancia, que permita su acondicionamiento mediante alguno de los chips más comunes. El proceso seguido es el mismo que se ha explicado con anterioridad y con este se obtienen los datos siguientes:

Tabla 12: Valores del segundo prototipo a 20 Hz

Hz	20				
Humedad (%)	R(Ω)	X(Ω)	C(F)	Z(Ω)	fase($^\circ$)
25	3,78E+08	-7,43E+08	1,07E-11	8,34E+08	-63,04
30	3,33E+08	-4,66E+08	1,71E-11	5,73E+08	-54,45
35	2,79E+08	-3,30E+08	2,41E-11	4,32E+08	-49,81
40	2,16E+08	-2,06E+08	3,86E-11	2,99E+08	-43,66
45	1,64E+08	-1,27E+08	6,26E-11	2,07E+08	-37,78
50	1,07E+08	-6,32E+07	1,26E-10	1,25E+08	-30,47
55	5,94E+07	-2,33E+07	3,42E-10	6,38E+07	-21,42
60	2,09E+07	-4,56E+06	1,75E-09	2,13E+07	-12,34
65	1,23E+07	-1,95E+06	4,08E-09	1,25E+07	-9,01
70	2,68E+06	-1,84E+05	4,32E-08	2,69E+06	-3,93
75	1,49E+06	-8,16E+04	9,75E-08	1,49E+06	-3,13
80	3,13E+05	-1,30E+04	6,12E-07	3,13E+05	-2,38
85	2,54E+05	-7,48E+03	1,06E-06	2,54E+05	-1,69
90	2,44E+04	-4,31E+02	1,85E-05	2,44E+04	-1,01
95	1,22E+04	-6,67E+01	1,19E-04	1,22E+04	-0,31

A la frecuencia de 20 Hz no se ha obtenido una reducción suficiente de los valores para poder ser capaces de medir en todo el ciclo de humedad, aunque sigue siendo la frecuencia donde se podría llegar a conseguir la mejor sensibilidad, debido a variaciones grandes de la impedancia, para variaciones pequeñas de la humedad, los valores tan grandes no permiten tener un acondicionamiento suficientemente reducido.

Tabla 13: Valores del segundo prototipo a 200 Hz

Hz	200				
Humedad (%)	R(Ω)	X(Ω)	C(F)	Z(Ω)	fase($^\circ$)
25	2,88E+07	-1,24E+08	6,42E-12	1,27E+08	-76,92
30	3,40E+07	-1,02E+08	7,80E-12	1,08E+08	-71,57
35	3,65E+07	-8,52E+07	9,34E-12	9,27E+07	-66,84
40	3,55E+07	-6,37E+07	1,25E-11	7,29E+07	-60,90
45	3,22E+07	-4,65E+07	1,71E-11	5,65E+07	-55,32
50	2,68E+07	-3,22E+07	2,47E-11	4,19E+07	-50,23
55	2,11E+07	-1,89E+07	4,21E-11	2,83E+07	-41,88
60	1,20E+07	-6,50E+06	1,22E-10	1,36E+07	-28,54
65	8,40E+06	-3,46E+06	2,30E-10	9,08E+06	-22,39
70	2,32E+06	-3,94E+05	2,02E-09	2,35E+06	-9,64
75	1,48E+06	-1,88E+05	4,23E-09	1,49E+06	-7,24
80	3,10E+05	-1,15E+04	6,90E-08	3,10E+05	-2,13
85	2,46E+05	-7,81E+03	1,02E-07	2,46E+05	-1,82
90	2,37E+04	-2,11E+02	3,78E-06	2,37E+04	-0,51
95	1,18E+04	-1,88E+02	4,24E-06	1,18E+04	-0,92

En 200 Hz la reducción de los valores es notable, pero no llega a ser suficiente para poder realizar las medidas deseadas con el acondicionamiento deseado.

Tabla 14: Valores del segundo prototipo a 2000 Hz

Hz	2000				
Humedad (%)	R(Ω)	X(Ω)	C(F)	Z(Ω)	fase($^\circ$)
25	5,32E+06	-1,49E+07	5,34E-12	1,58E+07	-70,35
30	5,45E+06	-1,38E+07	5,77E-12	1,48E+07	-68,44
35	5,59E+06	-1,25E+07	6,37E-12	1,37E+07	-65,91
40	5,70E+06	-1,09E+07	7,30E-12	1,23E+07	-62,39
45	5,69E+06	-9,30E+06	8,56E-12	1,09E+07	-58,54
50	5,34E+06	-7,24E+06	1,10E-11	9,00E+06	-53,59
55	4,75E+06	-5,38E+06	1,48E-11	7,18E+06	-48,56
60	3,73E+06	-3,06E+06	2,60E-11	4,82E+06	-39,36
65	3,12E+06	-2,00E+06	3,98E-11	3,71E+06	-32,66
70	1,51E+06	-4,13E+05	1,93E-10	1,57E+06	-15,30
75	1,08E+06	-1,98E+05	4,03E-10	1,10E+06	-10,37
80	2,82E+05	1,20E+04	6,63E-09	2,83E+05	2,43
85	2,31E+05	1,42E+04	5,62E-09	2,32E+05	3,50
90	2,34E+04	2,53E+03	3,15E-08	2,35E+04	6,17
95	1,13E+04	2,96E+02	2,69E-07	1,13E+04	1,50

En 2000 Hz la reducción ha sido muy cercana a la deseada, dejando el valor más alto de impedancia en 15M Ω . Esto indica que un aumento pequeño de la longitud de las ramas sería suficiente para obtener todo el ciclo de medición dentro de lo deseado.

Además se observa una muy buena relación en la variación entre la impedancia y la humedad en el sensor a esta frecuencia.

Tabla 15: Valores del segundo prototipo a 20000 Hz

Hz	20000				
Humedad (%)	R(Ω)	X(Ω)	C(F)	Z(Ω)	fase($^\circ$)
25	4,17E+06	-2,54E+06	3,13E-12	4,88E+06	-31,35
30	4,05E+06	-2,41E+06	3,30E-12	4,71E+06	-30,76
35	3,92E+06	-2,22E+06	3,58E-12	4,50E+06	-29,52
40	3,77E+06	-2,03E+06	3,92E-12	4,28E+06	-28,30
45	3,60E+06	-1,77E+06	4,50E-12	4,01E+06	-26,18
50	3,42E+06	-1,49E+06	5,34E-12	3,73E+06	-23,54
55	3,11E+06	-1,12E+06	7,11E-12	3,31E+06	-19,81
60	2,57E+06	-6,45E+05	1,23E-11	2,65E+06	-14,10
65	2,26E+06	-4,11E+05	1,94E-11	2,30E+06	-10,30
70	1,45E+06	-3,18E+04	2,50E-10	1,45E+06	-1,25
75	1,17E+06	1,21E+05	6,58E-11	1,18E+06	5,90
80	4,54E+05	1,79E+05	4,45E-11	4,88E+05	21,50
85	3,64E+05	1,70E+05	4,68E-11	4,02E+05	25,05
90	3,12E+04	2,43E+04	3,27E-10	3,95E+04	37,97
95	1,29E+04	5,52E+03	1,44E-09	1,41E+04	23,12

En el caso de 20000 Hz todos los valores de impedancia entran en el rango de medición, pero en este caso el comportamiento del sensor, en algunos momentos, hace que no sea la frecuencia idónea para realizar las medidas, o al menos mirando las tablas. Se acabará de analizar la posibilidad de usar esta frecuencia como frecuencia de medida después de analizar las gráficas que se presentarán más adelante en este estudio.

Tabla 16: Valores del segundo prototipo a 200000 Hz

Hz	200000				
Humedad (%)	R(Ω)	X(Ω)	C(F)	Z(Ω)	fase($^\circ$)
25	-3,76E+03	-6,45E+04	1,23E-11	6,46E+04	86,66
30	-3,48E+03	-6,55E+04	1,21E-11	6,56E+04	86,96
35	-4,20E+03	-6,63E+04	1,20E-11	6,64E+04	86,38
40	-4,33E+03	-6,65E+04	1,20E-11	6,66E+04	86,27
45	-3,89E+03	-6,73E+04	1,18E-11	6,74E+04	86,69
50	-3,75E+03	-6,75E+04	1,18E-11	6,76E+04	86,82
55	-3,05E+03	-6,78E+04	1,17E-11	6,79E+04	87,42
60	-1,70E+03	-6,84E+04	1,16E-11	6,84E+04	88,58
65	-6,30E+02	-6,92E+04	1,15E-11	6,92E+04	89,48
70	2,92E+03	-7,00E+04	1,14E-11	7,01E+04	-87,61
75	5,10E+03	-7,25E+04	1,10E-11	7,27E+04	-85,98
80	1,71E+04	-7,88E+04	1,01E-11	8,06E+04	-77,74
85	1,95E+04	-7,97E+04	9,98E-12	8,20E+04	-76,27
90	7,21E+04	-2,48E+04	3,21E-11	7,62E+04	-18,98
95	4,36E+04	1,08E+04	7,40E-11	4,49E+04	13,85

El caso de 200000 Hz es donde el sensor se comporta con el rango de valores más pequeño, durante la primera mitad de las medidas de humedad el sensor construido para comportarse de forma capacitiva, se comporta como una bobina, mientras que durante la segunda parte de la toma de medidas el sensor se comporta como un condensador.

Este comportamiento y el hecho de tener un rango de valores tan pequeño hacen difícil que se quiera trabajar en esta frecuencia con el sensor.

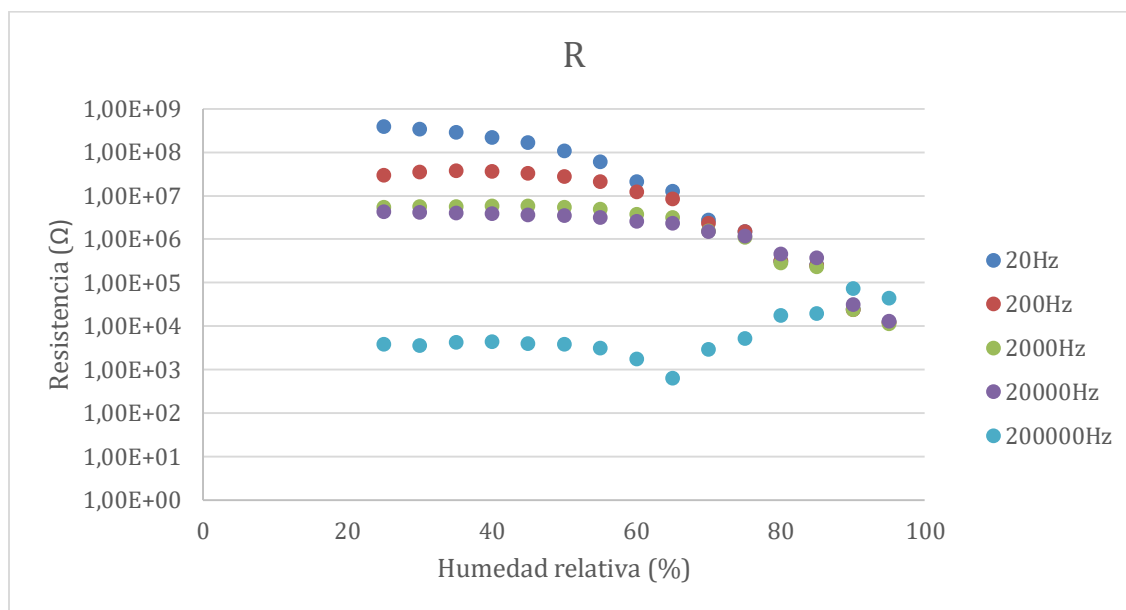
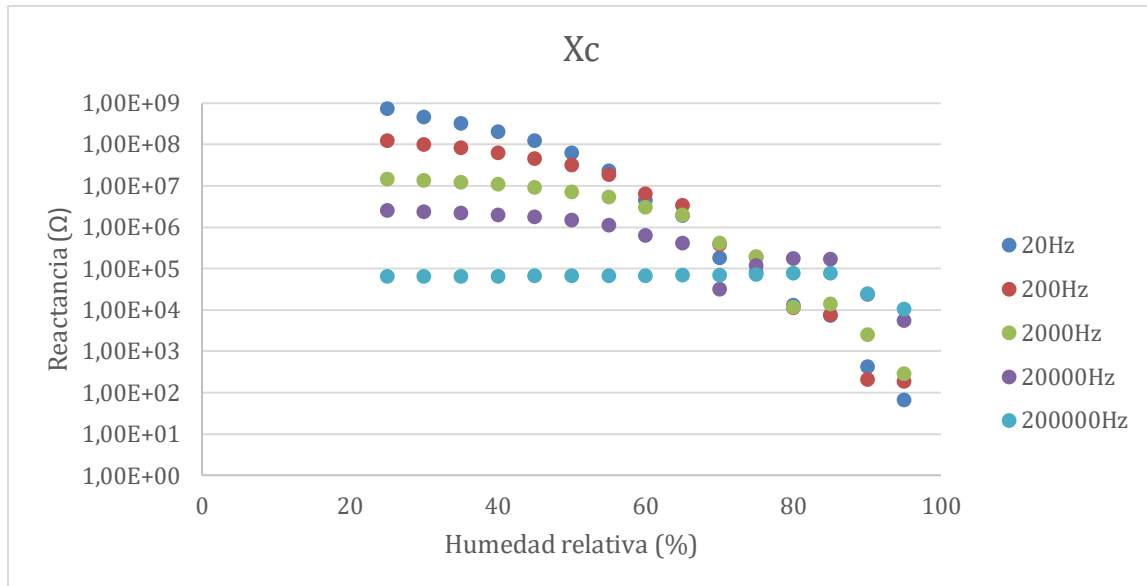


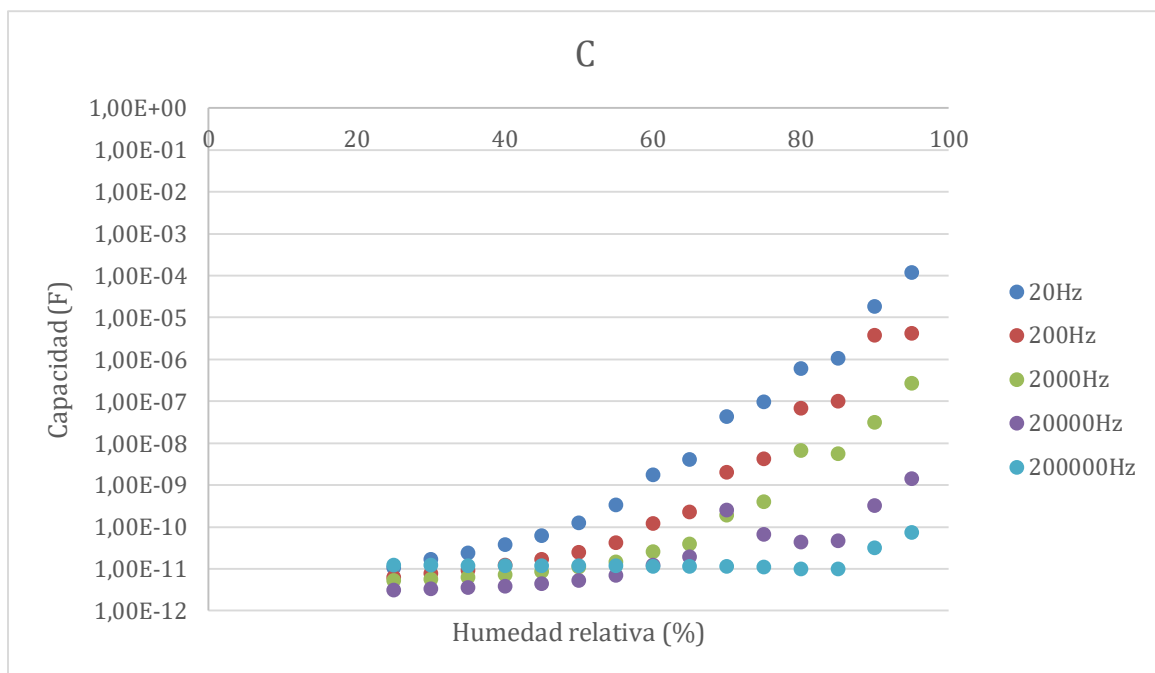
Ilustración 32: Gráfica de los valores de resistencia para el segundo prototipo

Recordar que los ejes de los valores eléctricos del sensor están puestos de forma logarítmica para que permita el análisis de todas las frecuencias en una gráfica de forma sencilla y visual. Debido a que los rangos de valores pueden llegar a ser muy dispares para las diferentes frecuencias representadas.

En lo que respecta a la resistencia se aprecian valores muy similares para las frecuencias de 2000 y 20000 Hz. En estas dos frecuencias, más adelante podremos observar más significativamente la variación de la reactancia en la impedancia, debido a este hecho, y que se podrá hacer una comparación muy directa entre ellas. Ya se observa el comportamiento casi constante de la frecuencia de 200000 Hz y como experimenta un crecimiento al final del ciclo.



Il·lustració 33: Gràfica de los valores de reactancia para el segundo prototipo



Il·lustració 34: Gràfica de los valores de capacidad para el segundo prototipo

Los valores de X_c y C nos muestran realmente lo que se desea medir de forma eficaz y donde se verá de forma directa el efecto de la humedad sobre nuestro sensor capacitivo. En el caso de la X_c podemos observar una buena regresión y variación de los valores para las frecuencias de 20, 200 y 2000 Hz. Las frecuencias de 20000 y 200000 Hz tienen comportamientos que el acondicionamiento no sería capaz de medir, y después no sería posible realizar una correcta traducción, por tanto podrían quedar descartadas como frecuencias posibles. En la gráfica de la reactancia además se puede observar en el punto de 80% de humedad relativa que las tres frecuencias que presentan un comportamiento adecuado para su medición, en este punto han sufrido un

desplazamiento. Este desplazamiento es debido al funcionamiento de la cámara climática que, cuando se llega a un punto de humedad entre 70-75% y se desea aumentar hasta un 80% realiza una serie de subidas y bajadas de humedad para intentar alcanzar este valor que en ocasiones puede resultar en un valor que discrepa del resto, modificando la posición que debería ocupar en la curva. Incluso se puede apreciar como los siguientes puntos de la curva continúan la tendencia esperada del resto de la curva y solo se aprecia este punto discrepante del resto. Esta discrepancia se aprecia tanto en la curva de la reactancia como en la curva de la capacidad del sensor.

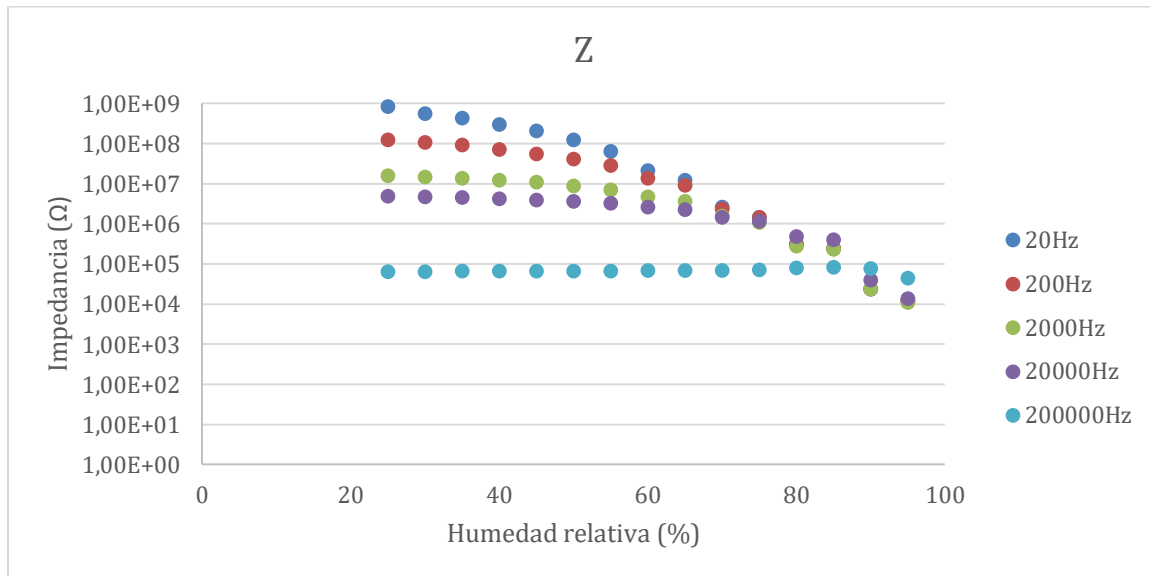
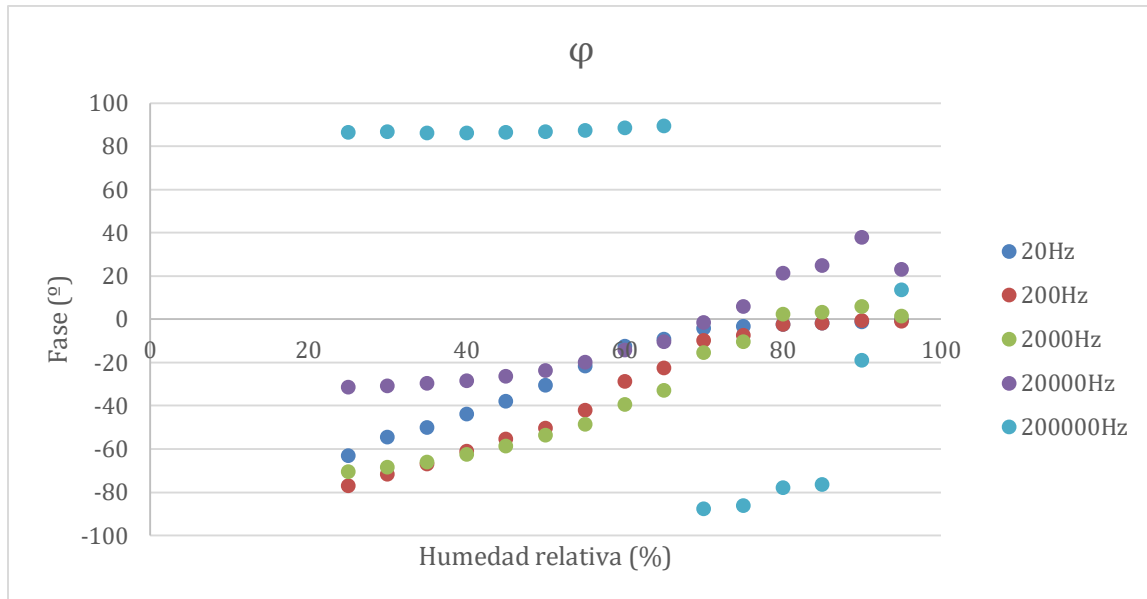


Ilustración 35: Gráfica de los valores de impedancia para el segundo prototipo

La impedancia nos muestra el valor que se obtendría con el circuito integrado, y que se debería acondicionar con tal de obtener un sensor capaz de darnos un valor de la humedad relativa sensado.

La sensibilidad del mismo sería muy importante junto a su precisión y dispersión de los valores. Es por ello que debemos tener en cuenta esto para analizar las diferentes frecuencias a las cuales podemos trabajar. Se observa que las frecuencias de 200 y 2000 Hz tienen los valores más cercanos a los que se estaban buscando para poder utilizar el circuito integrado, además de tener unos rangos de los valores entre las diferentes medidas muy buenos para poder proporcionar una buena sensibilidad final del sensor.

El único inconveniente que se puede encontrar en 20 Hz es el orden de magnitud de sus valores, pero dada la geometría, para poder conseguir una reducción en ello se podría necesitar un aumento del tamaño del sensor excesivo.



Il·lustració 36: Gràfica de los valores de fase para el segundo prototipo

Para finalizar el análisis de los resultados obtenidos del segundo sensor hay que analizar la evolución de la fase de la impedancia. Se observa como las tres primeras frecuencias empiezan con una fase que indica que el circuito equivalente es capacitivo, y que con la aparición de la humedad esta fase evoluciona con una regresión casi lineal hasta pasar a ser un circuito con fase muy cercana a 0° . En lo que respecta a las otras dos frecuencias se obtienen comportamientos muy dispares, mientras que a 20000 Hz la fase se mantiene constante hasta 50% de humedad relativa y a partir de aquí, evoluciona con una regresión similar a la de las tres frecuencias explicadas con anterioridad. Mientras tanto a 200000 Hz inicialmente nos indica que tenemos un circuito inductivo, a 70% de humedad relativa cambia por completo y se convierte en un circuito capacitivo.

Concluyendo este análisis de la geometría del segundo sensor realizado, observamos varias cosas. Primero que a la frecuencia de 200000 Hz estamos obteniendo valores de resistencia negativos que indican que está pasando algo extraño a esta frecuencia, los valores de resistencia negativa carecen de sentido, y que ya indica que esta frecuencia no será adecuada para nuestro uso del sensor. Segundo, el comportamiento del sensor a 20000 Hz no nos permite obtener correctos valores para el sensado de la humedad, ya que en algunas situaciones no siguen ninguna tendencia clara. Finalmente vemos que las tres primeras frecuencias, 20, 200 y 2000 Hz nos proporcionan unos valores que siguen unas tendencias muy susceptibles de ser medidas y acondicionadas para un uso real del sensor. Para diferenciar entre estas tres frecuencias, la única característica que servirá para su elección será el orden de magnitud de los valores, y que por tanto en el caso de querer utilizar el circuito integrado del cual se ha hablado con anterioridad se debería usar una frecuencia de 2000 Hz, o cercana a esta.

Una vez llegada a estas conclusiones sobre el sensor se deberá pasar al siguiente nivel del estudio. Es necesario valorar la reproducibilidad del sensor.

8.3 Reproducibilidad del sensor diseñado

Una vez se ha analizado el segundo prototipo y haber obtenido una muestra de lo que varía la capacidad del sensor según la longitud del sensor, esto ya proporciona la información necesaria para poder obtener un sensor de humedad, con la capacidad necesaria para ser medido por un circuito de acondicionamiento que pueda llegar a ser de un tamaño reducido. Una vez se ha llegado a este punto del estudio se plantea otra duda acerca del funcionamiento del sensor. ¿Podemos reproducir los resultados obtenidos por este sensor?

Es esta duda la que se dispone a aclarar a continuación e intentar dar respuesta a las posibles discrepancias si las hay. Para conseguir, en un futuro, saber reproducir los resultados obtenidos por los sensores.

Se inicia la construcción de tres sensores más (sensores basados en el segundo prototipo), con la tela de algodón, los hilos conductores y el de algodón, la técnica de bordado y el análisis de la geometría igual que el utilizado para el segundo prototipo. Para poder diferenciar entre los 4 sensores que tendremos finalmente iguales, se pasara a denominarlos de la siguiente forma.

- Segundo prototipo: pasa a denominarse S1A
- Segundo prototipo 2: se denominará S1B
- Segundo prototipo 3: se denominará S1C
- Segundo prototipo 4: se denominará S1D

Se realiza la construcción de estos tres sensores adicionales. Se cortan pedazos de tela de algodón del mismo tamaño que el sensor S1A. Y nos disponemos a usar la misma imagen para bordar en la bordadora del laboratorio. Se realizan todos los bordados y se dispone a hacer un control de calidad para detectar cortocircuitos entre los dos electrodos.

Es en este punto donde para cada sensor es necesario cortar el punto de unión que la bordadora necesita para poder bordar los dos electrodos. Pero es en este momento cuando al analizar el sensor S1B se observan algunos defectos. El sensor S1B muestra una cantidad de hilos uniendo o provocando contacto entre los dos electrodos, superior al resto. El hecho es un hecho aislado después de todos los sensores que se han bordado durante este estudio. En este caso se retiran estos hilos, y algunos más de uno de los electrodos de este sensor y se decide medir igual para ver cómo responde este sensor, que se podría decir de alguna forma que ha salido defectuoso.

Se pretende realizar medidas durante un ciclo de variación de humedad relativa de entre 25-80 %. Se realiza entre estos valores para poder optimizar el proceso y no gastar demasiado tiempo en el rango de 80-100% donde la maquina no se comporta de forma constante, además de evitar medidas defectuosas debido a este hecho.

Una vez obtenidos todos los valores de estos tres sensores se compararán entre ellos y además se incorporará en la misma gráfica, los valores del sensor S1A, del apartado anterior, que aunque sean de un ciclo completo de medición de humedad relativa permitirá tener una muestra más para valorar la reproducibilidad.

Como última aclaración antes de mostrar los resultados de los diferentes sensores, se ha elegido una frecuencia específica donde realizar la comparación. Esta decisión se ha tomado de cara al análisis de la frecuencia de 200 Hz. Como se había hablado con

anterioridad en este estudio se había llegado a la conclusión que el uso del sensor las mejores frecuencias de funcionamiento eran 200 y 2000 Hz, tanto por rango de valores como por evolución de los mismos. Y de estas dos se ha decidido 200 Hz. Cabe indicar que el resto de las gráficas del estudio de reproducibilidad a diferentes frecuencias se podrán encontrar en el Anexo A. A continuación se muestran las tablas de valores obtenidas y las gráficas:

Tabla 17: Valores del sensor S1A a 200 Hz

S1A	200 Hz				
Humedad (%)	R(Ω)	X(Ω)	C(F)	Z(Ω)	fase($^\circ$)
25	2,88E+07	-1,24E+08	6,42E-12	1,27E+08	-76,92
30	3,40E+07	-1,02E+08	7,80E-12	1,08E+08	-71,57
35	3,65E+07	-8,52E+07	9,34E-12	9,27E+07	-66,84
40	3,55E+07	-6,37E+07	1,25E-11	7,29E+07	-60,90
45	3,22E+07	-4,65E+07	1,71E-11	5,65E+07	-55,32
50	2,68E+07	-3,22E+07	2,47E-11	4,19E+07	-50,23
55	2,11E+07	-1,89E+07	4,21E-11	2,83E+07	-41,88
60	1,20E+07	-6,50E+06	1,22E-10	1,36E+07	-28,54
65	8,40E+06	-3,46E+06	2,30E-10	9,08E+06	-22,39
70	2,32E+06	-3,94E+05	2,02E-09	2,35E+06	-9,64
75	1,48E+06	-1,88E+05	4,23E-09	1,49E+06	-7,24
80	3,10E+05	-1,15E+04	6,90E-08	3,10E+05	-2,13
85	2,46E+05	-7,81E+03	1,02E-07	2,46E+05	-1,82
90	2,37E+04	-2,11E+02	3,78E-06	2,37E+04	-0,51
95	1,18E+04	-1,88E+02	4,24E-06	1,18E+04	-0,92

En la Tabla 17 se observan los mismos valores expuestos en el apartado anterior, que se vuelven a exponer aquí para poder tenerlos a la vista y compararlos con las otras tablas que se van a presentar.

Tabla 18: Valores del sensor S1B a 200 Hz

S1B	200 Hz				
Humedad (%)	R(Ω)	X(Ω)	C(F)	Z(Ω)	fase($^\circ$)
25	2,57E+07	-1,29E+08	6,19E-12	1,31E+08	-78,69
30	2,92E+07	-1,17E+08	6,81E-12	1,20E+08	-75,99
35	3,28E+07	-9,82E+07	8,10E-12	1,04E+08	-71,53
40	3,40E+07	-7,97E+07	9,98E-12	8,67E+07	-66,88
45	3,32E+07	-6,56E+07	1,21E-11	7,35E+07	-63,18
50	3,07E+07	-4,96E+07	1,60E-11	5,83E+07	-58,30
55	2,71E+07	-3,48E+07	2,29E-11	4,41E+07	-52,11
60	2,05E+07	-1,82E+07	4,37E-11	2,74E+07	-41,65
65	1,63E+07	-1,15E+07	6,92E-11	1,99E+07	-35,20
70	1,18E+07	-6,45E+06	1,23E-10	1,34E+07	-28,66
75	3,63E+06	-8,50E+05	9,36E-10	3,73E+06	-13,18
80	2,16E+06	-3,60E+05	2,21E-09	2,19E+06	-9,47

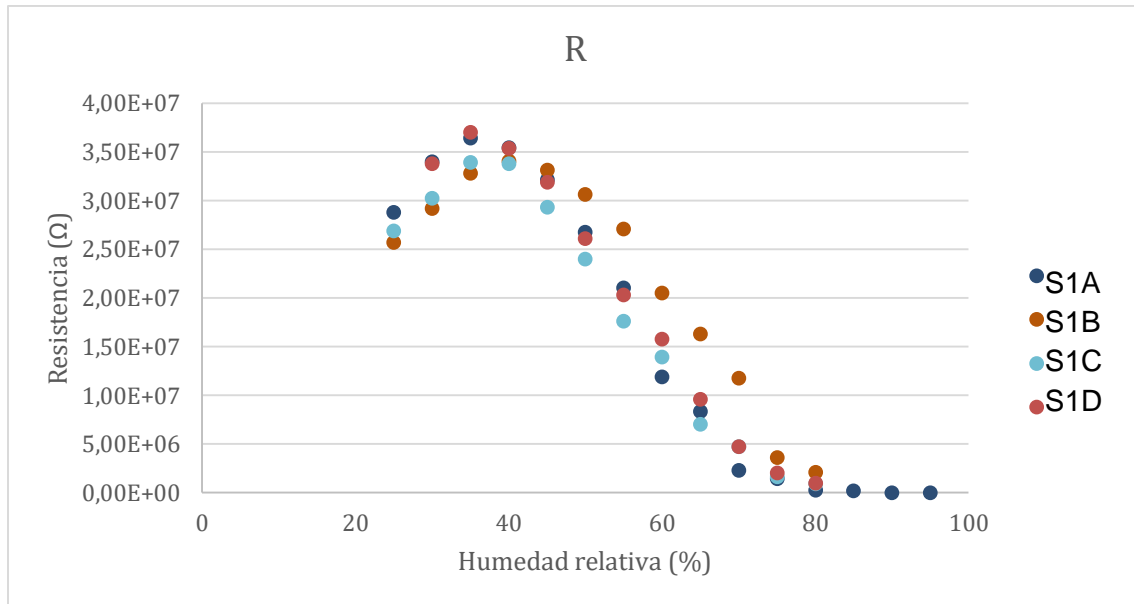
Tabla 19: Valores del sensor S1C a 200 Hz

S1C	200 Hz				
Humedad (%)	R(Ω)	X(Ω)	C(F)	Z(Ω)	fase($^\circ$)
25	2,69E+07	-1,17E+08	6,82E-12	1,20E+08	-77,00
30	3,03E+07	-1,05E+08	7,56E-12	1,10E+08	-73,97
35	3,39E+07	-8,49E+07	9,37E-12	9,14E+07	-68,23
40	3,38E+07	-6,57E+07	1,21E-11	7,38E+07	-62,78
45	2,94E+07	-4,40E+07	1,81E-11	5,29E+07	-56,27
50	2,40E+07	-2,97E+07	2,68E-11	3,82E+07	-51,10
55	1,76E+07	-1,69E+07	4,71E-11	2,44E+07	-43,79
60	1,40E+07	-1,10E+07	7,21E-11	1,78E+07	-38,30
65	7,08E+06	-3,36E+06	2,37E-10	7,84E+06	-25,39
70	4,73E+06	-1,66E+06	4,79E-10	5,01E+06	-19,34
75	1,66E+06	-2,76E+05	2,88E-09	1,68E+06	-9,44
80	9,64E+05	-1,14E+05	6,98E-09	9,71E+05	-6,74

Tabla 20: Valores del sensor S1D a 200 Hz

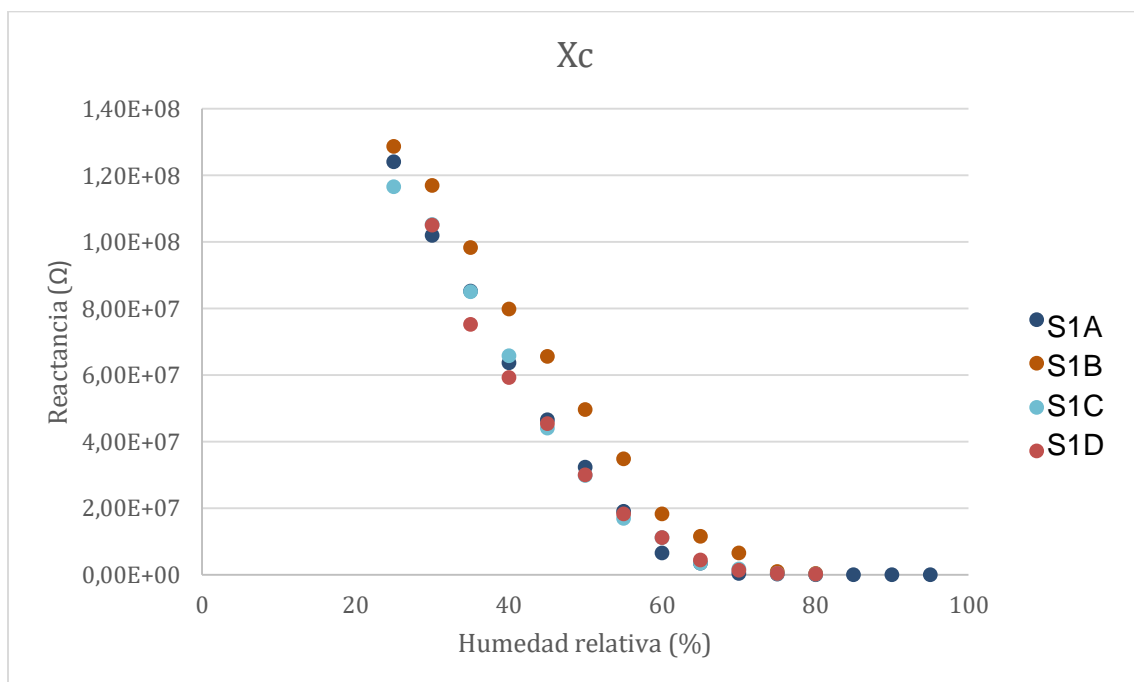
S1D	200 Hz				
Humedad (%)	R(Ω)	X(Ω)	C(F)	Z(Ω)	fase($^\circ$)
30	3,38E+07	-1,05E+08	7,58E-12	1,10E+08	-72,16
35	3,70E+07	-7,51E+07	1,06E-11	8,37E+07	-63,77
40	3,54E+07	-5,91E+07	1,35E-11	6,89E+07	-59,09
45	3,19E+07	-4,53E+07	1,76E-11	5,54E+07	-54,81
50	2,61E+07	-2,99E+07	2,66E-11	3,97E+07	-48,85
55	2,03E+07	-1,83E+07	4,36E-11	2,73E+07	-41,96
60	1,58E+07	-1,11E+07	7,20E-11	1,93E+07	-34,97
65	9,65E+06	-4,41E+06	1,80E-10	1,06E+07	-24,56
70	4,79E+06	-1,28E+06	6,22E-10	4,96E+06	-14,96
75	2,07E+06	-2,95E+05	2,70E-09	2,09E+06	-8,10
80	1,04E+06	-8,96E+04	8,88E-09	1,04E+06	-4,92

Visualmente en las tablas no se aprecia indicios de que el sensor S1B se comporte de forma defectuosa. Sí que se observa un desplazamiento de los datos del mismo en comparación a los números de los otros dos sensores bordados para esta experimentación. A continuación se disponen las diferentes gráficas para cada uno de los factores que se han medido o calculado, con el objetivo de poder observar, en una misma frecuencia, como se comportan los sensores en relación unos a otros. A continuación se presentan las gráficas donde veremos los diferentes puntos de cada sensor diferenciados por colores:

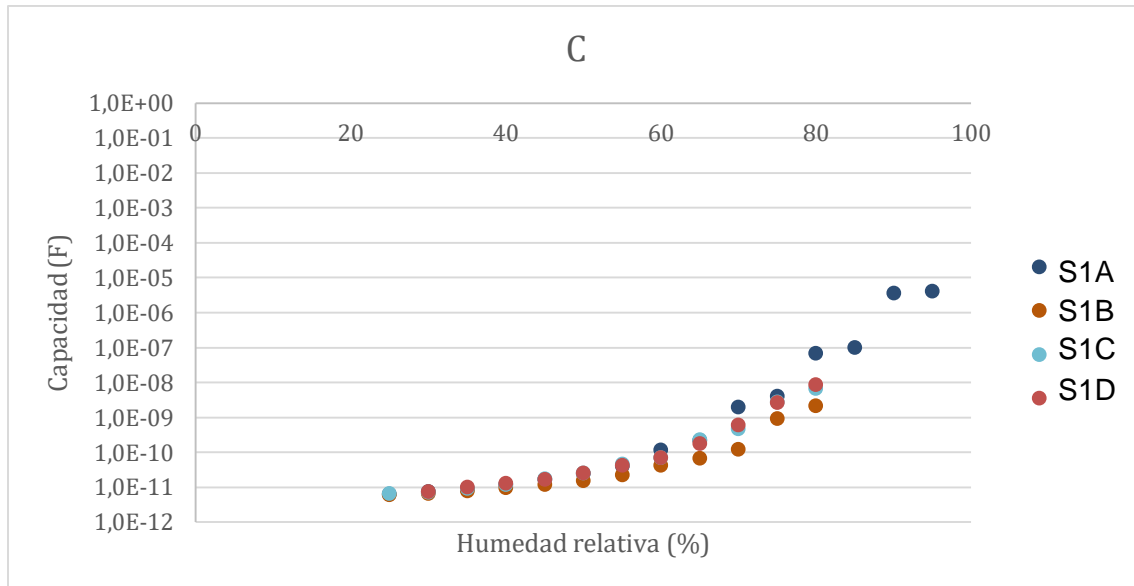


Il·lustració 37: Evolució valors de resistència per als diferents sensors

En el gràfic de la resistència ja se aprecia el desplaçament lateral de los valores del sensor S1B, ese comportamiento podría ser debido a los defectos de fabricación del mismo; en los demás casos se muestran valores muy cercanos. Aunque en el caso de este sensor la resistencia no será medida, debido a que se está trabajando con un sensor capacitivo y no es la característica que nos interesa.

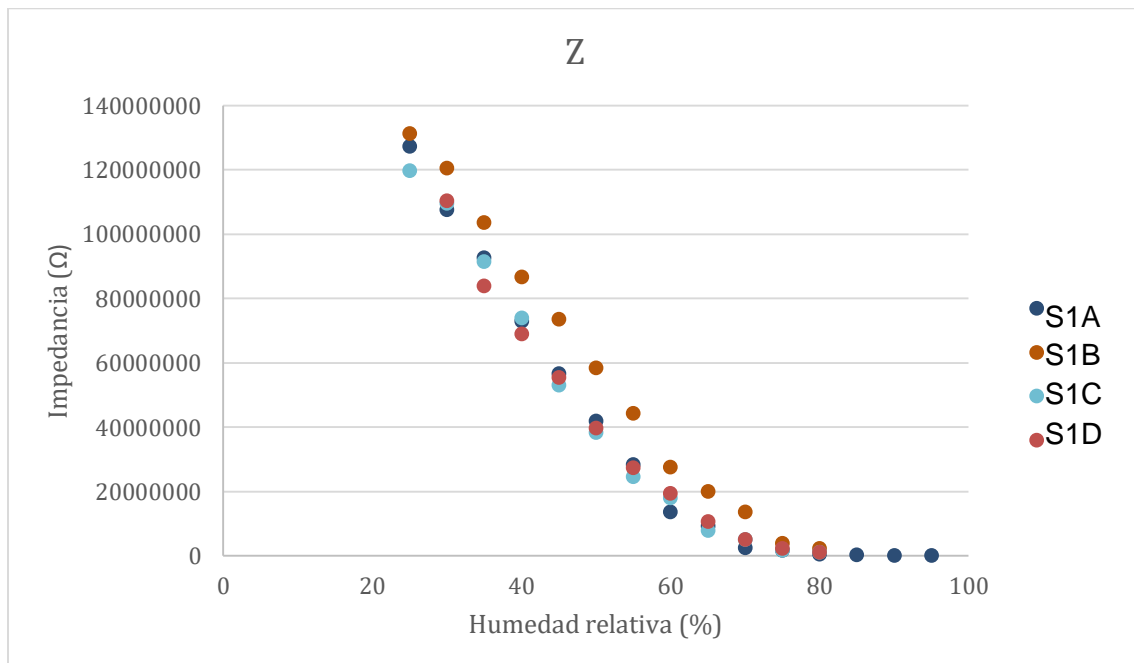


Il·lustració 38: Evolució valors de reactància per als diferents sensors

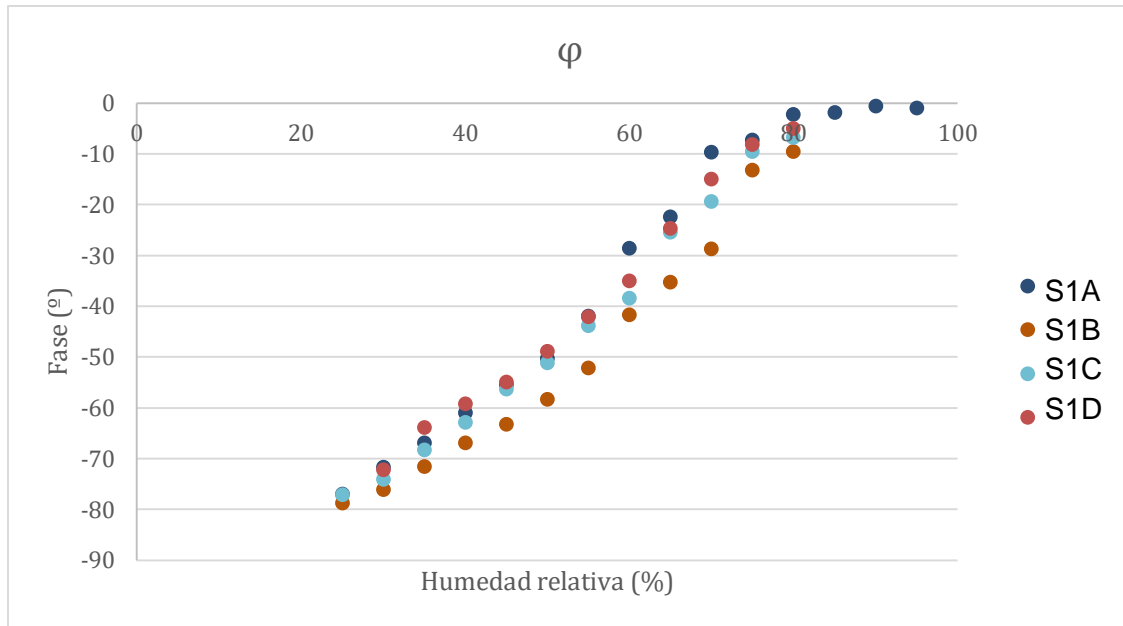


Il·lustració 39: Evolució valors de capacitat per als diferents sensors

Tanto en la reactancia como en el cálculo de la capacidad podemos seguir observando el desplazamiento lateral de los valores del sensor S1B. Este hecho da la posibilidad de al saber, y conocer que este sensor está defectuoso no tomar los datos como referencia para la valoración de la reproducibilidad del sensor. Por lo tanto en el análisis estadístico que se mostrará más adelante, combinando los datos de los diferentes sensores no se tomarán en cuenta los valores del sensor S1B.



Il·lustració 40: Evolució valors de impedancia per als diferents sensors

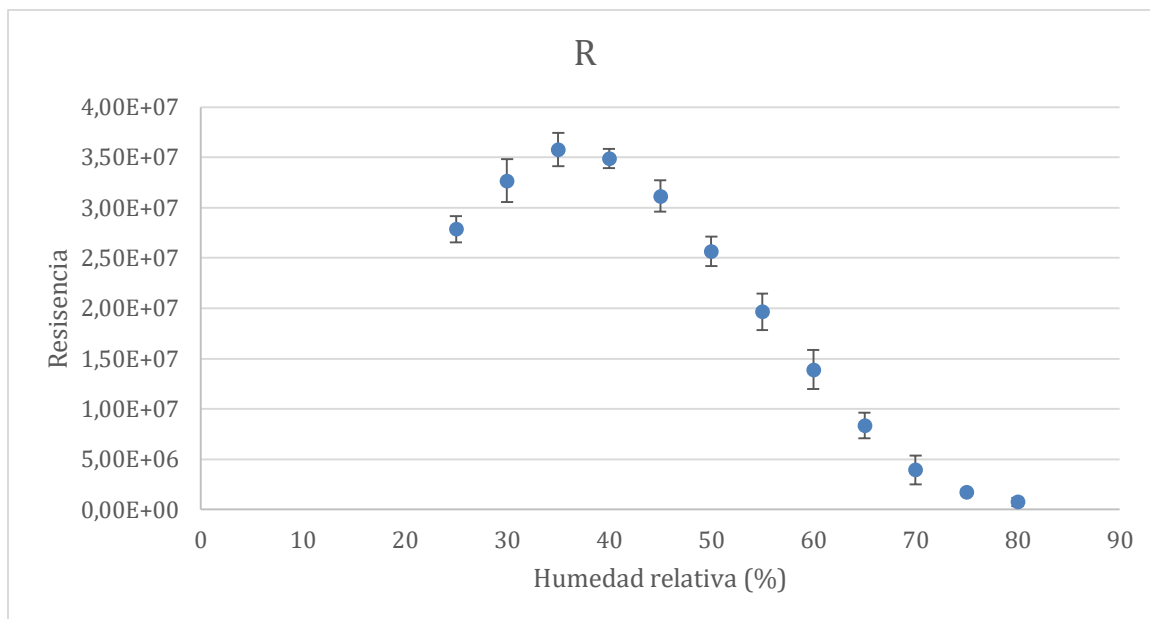


Il·lustració 41: Evolució valors de fase per als diferents sensors

Viendo las gráficas de impedancia y de fase se obtiene la misma sensación de desplazamiento lateral de los valores del sensor S1B. Durante todas las gráficas se han observado, en el resto de sensores, unos valores muy próximos que permitirían pensar en que se tiene la suficiente capacidad de reproducibilidad entre los sensores bordados para poder realizar en estudios futuros, un sistema de acondicionamiento para ellos. A continuación para acabar de analizar esta comparación entre los sensores se va a mostrar un estudio para cada valor de la media de los valores de los sensores bordados y la desviación estándar que existe entre los valores de estos. Para este proceso no se ha tenido en cuenta finalmente, debido a la dispersión que aportaba a la muestra. Los valores se alejaban demasiado del valor medio y se ha tomado como muestra deficiente. Una vez se ha eliminado del grupo el sensor S1B, se dispone a realizar el estudio de los valores y la desviación estándar entre los sensores S1A, S1C y S1D.

Tabla 21: Valores de media y desviación de la R

	200Hz				
R (Ω)	S1A	S1C	S1D	Mediana	Desviación
25	2,88E+07	2,69E+07	-	2,79E+07	1,33E+06
30	3,40E+07	3,03E+07	3,38E+07	3,27E+07	2,11E+06
35	3,65E+07	3,39E+07	3,70E+07	3,58E+07	1,65E+06
40	3,55E+07	3,38E+07	3,54E+07	3,49E+07	9,56E+05
45	3,22E+07	2,94E+07	3,19E+07	3,12E+07	1,56E+06
50	2,68E+07	2,40E+07	2,61E+07	2,56E+07	1,46E+06
55	2,11E+07	1,76E+07	2,03E+07	1,97E+07	1,82E+06
60	1,20E+07	1,40E+07	1,58E+07	1,39E+07	1,93E+06
65	8,40E+06	7,08E+06	9,65E+06	8,38E+06	1,29E+06
70	2,32E+06	4,73E+06	4,79E+06	3,95E+06	1,41E+06
75	1,48E+06	1,66E+06	2,07E+06	1,74E+06	3,02E+05
80	3,10E+05	9,64E+05	1,04E+06	7,71E+05	4,01E+05

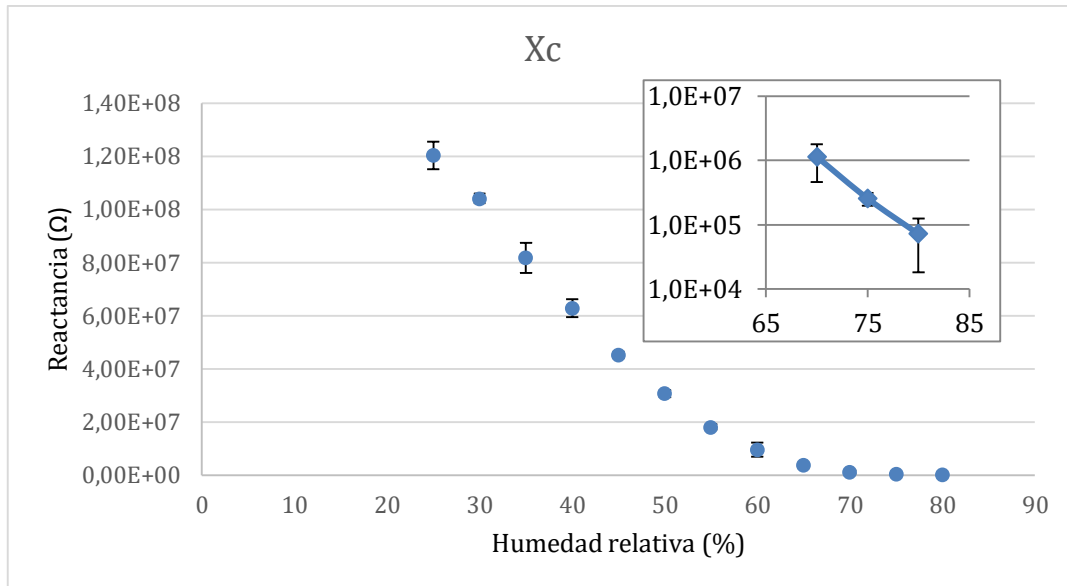


Il·lustració 42: Valores medios de la R con su desviación

La resistencia, como ya se ha dicho antes, no es un término sobre el que se tenga interés, debido que se está centrando el estudio en el comportamiento del sensor capacitivo. Al inicio de la experimentación la resistencia tiene una parte parabólica que dificultaría la posibilidad de tomar este valor para realizar el acondicionamiento, debido a que existen 2 puntos con el mismo valor de resistencia, a diferentes humedades.

Tabla 22: Valores de media y desviación de la Xc

Xc (Ω)	200Hz				
	S1A	S1C	S1D	Mediana	Desviación
25	1,24E+08	1,17E+08	-	1,20E+08	5,23E+06
30	1,02E+08	1,05E+08	1,05E+08	1,04E+08	1,82E+06
35	8,52E+07	8,49E+07	7,51E+07	8,17E+07	5,75E+06
40	6,37E+07	6,57E+07	5,91E+07	6,28E+07	3,37E+06
45	4,65E+07	4,40E+07	4,53E+07	4,52E+07	1,27E+06
50	3,22E+07	2,97E+07	2,99E+07	3,06E+07	1,38E+06
55	1,89E+07	1,69E+07	1,83E+07	1,80E+07	1,03E+06
60	6,50E+06	1,10E+07	1,11E+07	9,53E+06	2,63E+06
65	3,46E+06	3,36E+06	4,41E+06	3,74E+06	5,80E+05
70	3,94E+05	1,66E+06	1,28E+06	1,11E+06	6,50E+05
75	1,88E+05	2,76E+05	2,95E+05	2,53E+05	5,69E+04
80	1,15E+04	1,14E+05	8,96E+04	7,17E+04	5,35E+04

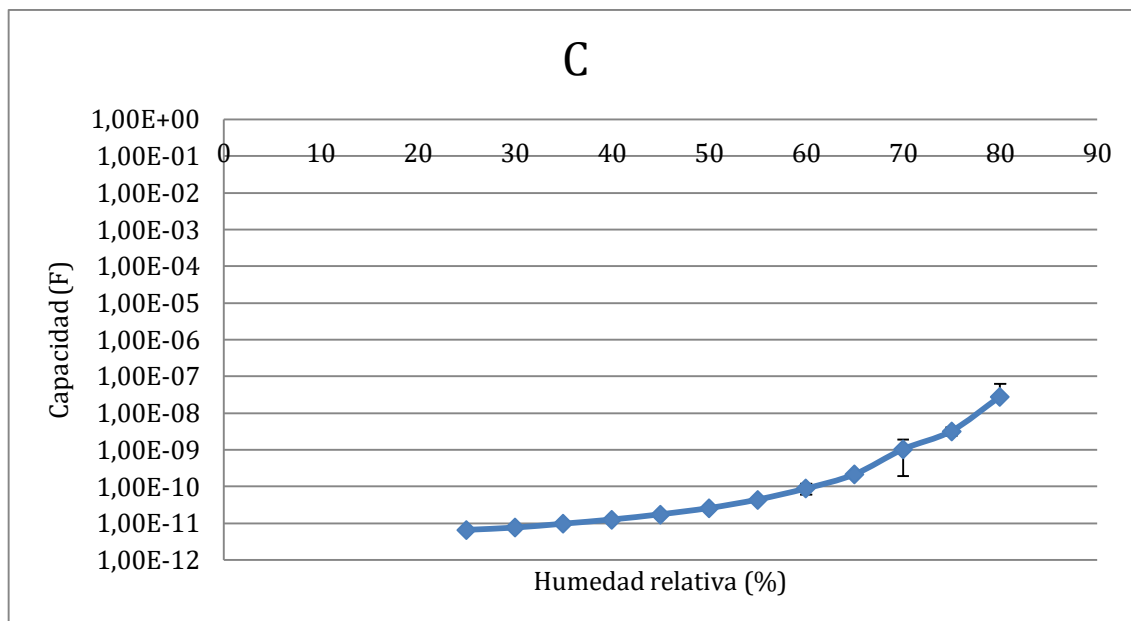


Il·lustració 43: Valors mitjans de la Xc con su desviación

En cuanto al valor de la reactancia, se observa una regresión de la misma muy aceptable, que se verá reflejada posteriormente en la capacidad y que después se valorará. La dispersión de los valores que se aprecia en la reactancia es bastante aceptable, haciendo que entre valores contiguos de diferentes humedades no se superpongan.

Tabla 23: Valores de media y desviación de la C

	200Hz				
C (F)	S1A	S1C	S1D	Mediana	Desviación
25	6,42E-12	6,82E-12	-	6,62E-12	2,88E-13
30	7,80E-12	7,56E-12	7,58E-12	7,65E-12	1,35E-13
35	9,34E-12	9,37E-12	1,06E-11	9,77E-12	7,16E-13
40	1,25E-11	1,21E-11	1,35E-11	1,27E-11	6,95E-13
45	1,71E-11	1,81E-11	1,76E-11	1,76E-11	4,95E-13
50	2,47E-11	2,68E-11	2,66E-11	2,60E-11	1,14E-12
55	4,21E-11	4,71E-11	4,36E-11	4,43E-11	2,58E-12
60	1,22E-10	7,21E-11	7,20E-11	8,88E-11	2,91E-11
65	2,30E-10	2,37E-10	1,80E-10	2,16E-10	3,08E-11
70	2,02E-09	4,79E-10	6,22E-10	1,04E-09	8,52E-10
75	4,23E-09	2,88E-09	2,70E-09	3,27E-09	8,35E-10
80	6,90E-08	6,98E-09	8,88E-09	2,83E-08	3,52E-08

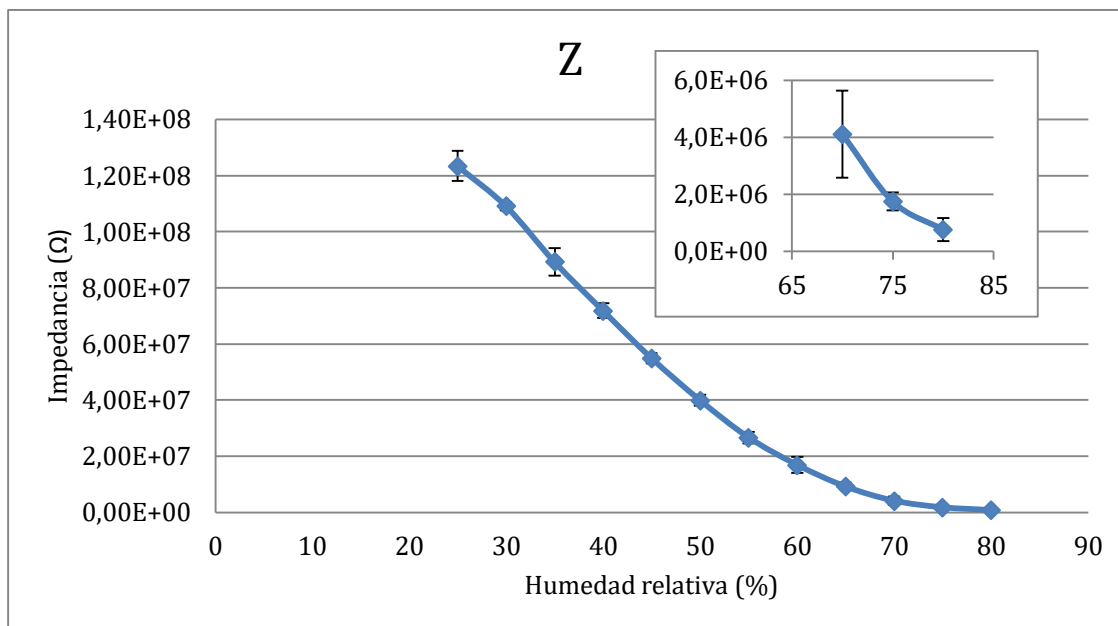


Il·lustració 44: Valores medios de la C con su desviación

En los valores de la C, la dispersión es muy aceptable. En el valor de 70 % de humedad relativa se obtiene el mayor error, en relación al valor medio, de todos los valores. En este caso el valor que está aportando esta diferenciación es el valor del sensor S1A, que es el sensor que ya estaba bordado y el mismo que había sufrido las fluctuaciones de la cámara climática. Aun así los valores de capacidad, que junto a los de la impedancia, serían candidatos a ser el factor medido por el circuito integrado para su acondicionamiento.

Tabla 24: Valores de media y desviación de la Z

	200Hz				
Z (Ω)	S1A	S1C	S1D	Mediana	Desviación
25	1,27E+08	1,20E+08	-	1,23E+08	5,40E+06
30	1,08E+08	1,10E+08	1,10E+08	1,09E+08	1,45E+06
35	9,27E+07	9,14E+07	8,37E+07	8,93E+07	4,85E+06
40	7,29E+07	7,38E+07	6,89E+07	7,19E+07	2,63E+06
45	5,65E+07	5,29E+07	5,54E+07	5,49E+07	1,89E+06
50	4,19E+07	3,82E+07	3,97E+07	3,99E+07	1,85E+06
55	2,83E+07	2,44E+07	2,73E+07	2,67E+07	2,03E+06
60	1,36E+07	1,78E+07	1,93E+07	1,69E+07	2,95E+06
65	9,08E+06	7,84E+06	1,06E+07	9,18E+06	1,39E+06
70	2,35E+06	5,01E+06	4,96E+06	4,11E+06	1,52E+06
75	1,49E+06	1,68E+06	2,09E+06	1,76E+06	3,06E+05
80	3,10E+05	9,71E+05	1,04E+06	7,75E+05	4,04E+05



Il·lustració 45: Valors mitjans de la Z con su desviación

Se puede observar que en la mayoría de los casos, tanto en la capacidad como en la impedancia, los valores de la desviación se encuentran un orden de magnitud por debajo de la medida real. Con esto, aún hay diferencia entre valores a diferentes humedades con los valores más dispersos, que permite observar el buen funcionamiento.

Tabla 25: Valores de media y desviación de la Fase

	200Hz				
Fase (°)	S1A	S1C	S1D	Mediana	Desviación
25	-7,69E+01	-7,70E+01	-	-7,70E+01	5,32E-02
30	-7,16E+01	-7,40E+01	-7,22E+01	-7,26E+01	1,25E+00
35	-6,68E+01	-6,82E+01	-6,38E+01	-6,63E+01	2,28E+00
40	-6,09E+01	-6,28E+01	-5,91E+01	-6,09E+01	1,85E+00
45	-5,53E+01	-5,63E+01	-5,48E+01	-5,55E+01	7,41E-01
50	-5,02E+01	-5,11E+01	-4,88E+01	-5,01E+01	1,13E+00
55	-4,19E+01	-4,38E+01	-4,20E+01	-4,25E+01	1,08E+00
60	-2,85E+01	-3,83E+01	-3,50E+01	-3,39E+01	4,96E+00
65	-2,24E+01	-2,54E+01	-2,46E+01	-2,41E+01	1,55E+00
70	-9,64E+00	-1,93E+01	-1,50E+01	-1,46E+01	4,86E+00
75	-7,24E+00	-9,44E+00	-8,10E+00	-8,26E+00	1,11E+00
80	-2,13E+00	-6,74E+00	-4,92E+00	-4,60E+00	2,32E+00

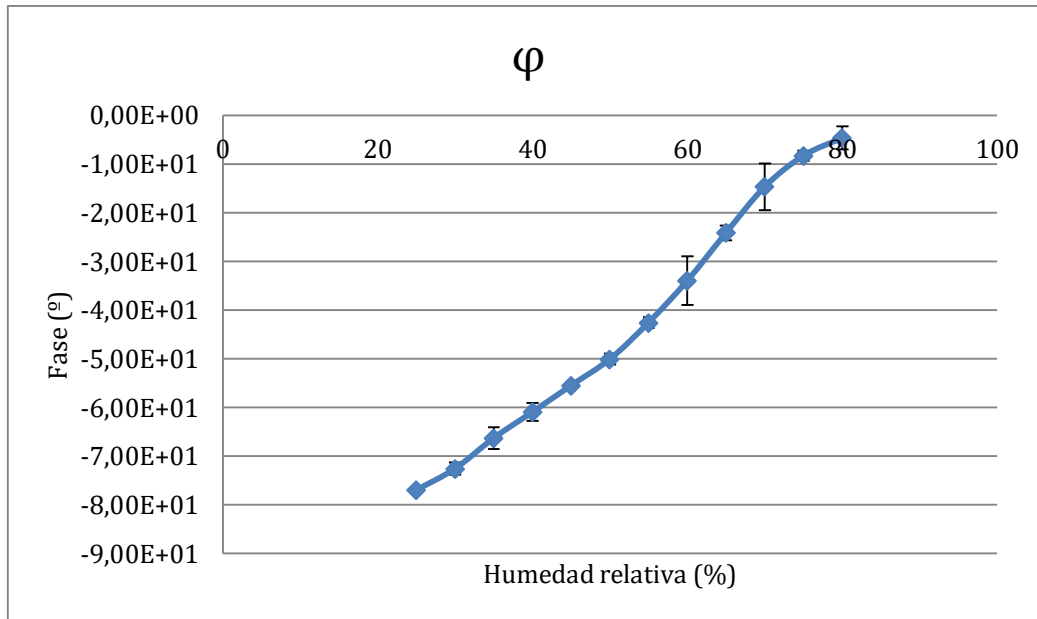


Ilustración 46: Valores medios de la Fase con su desviación

En cuanto a la fase se observan dos puntos donde existen desviaciones mayores y que en ambos casos, es el sensor S1A el que está dando esta dispersión.

Estas graficas permiten observar que el sensor S1A en los valores alrededor de 65 % de humedad relativa es el que está aportando la dispersión que está afectando a los valores, y que esto podría estar provocado por las fluctuaciones de la cámara climática que no permitía que el sensor se estabilizase en el valor adecuado. E incluso así se han obtenido valores de dispersión muy aceptables para poder realizar un acondicionamiento en etapas futuras de otro estudio. Y poder de esta forma comenzar a realizar integración del sensor en prendas de ropa y realizar un prototipo donde el sensor junto a una electrónica te esté aportando la información, a través de sus variaciones de capacidad o impedancia, de la humedad relativa.

8.4 Primera regresión del sensor

Después del estudio de reproducibilidad del sensor y haber visto la poca desviación que existe entre los tres sensores estudiados, recordar que se eliminó uno de los sensores por la detección de irregularidades en los valores obtenidos, se plantea la posibilidad de realizar una primera regresión de los valores obtenidos y utilizados en el apartado de la reproducibilidad. En este caso solo se realizará la regresión de 25% al 80% por ser los datos estudiados en la reproducibilidad, pero que sería extensible para los demás valores que se podrían obtener al hacer ciclos completos como el del sensor S1A.

Para los valores obtenidos se deberá estudiar en primer lugar la posibilidad de realizar una regresión completa, o en caso contrario, si existe la necesidad de realizar una regresión a trozos. En este apartado se observarán 3 parámetros que serían los que se medirían y de los cuales sería interesante tener la regresión para poder traducir las medidas a valores de humedad relativa.

Para iniciar este estudio de la regresión se tomará como primer valor a estudio la capacidad.

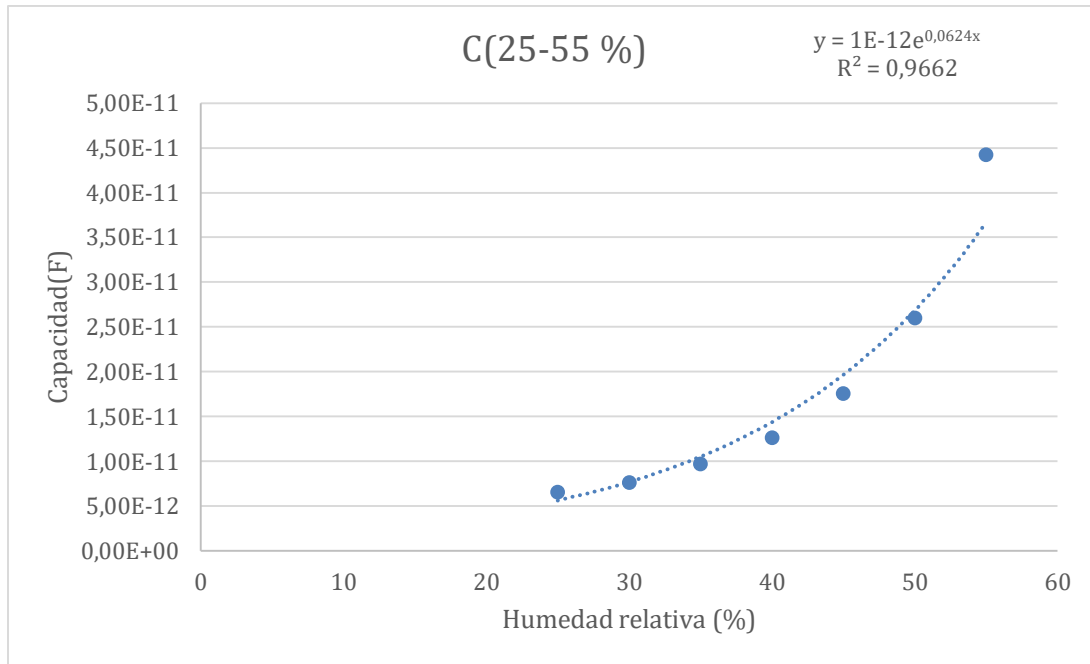


Ilustración 47: Regresión para los valores de capacidad de 25-55% HR

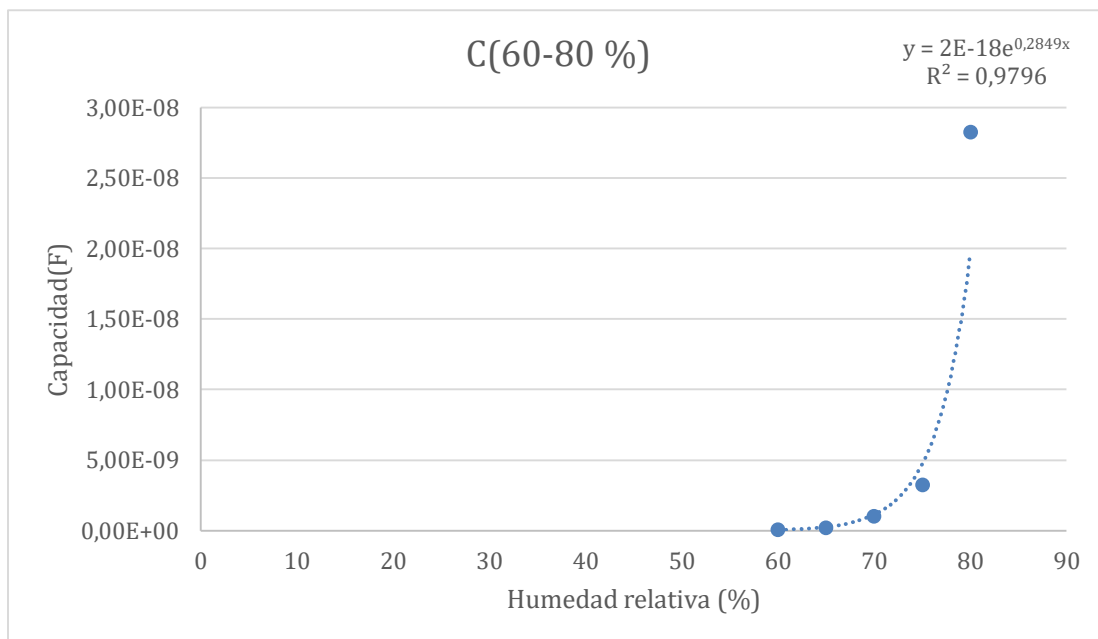


Ilustración 48: Regresión para los valores de capacidad de 60-80% HR

Como se puede observar para los valores de capacidad no se ha podido aproximar a una regresión lineal. En cambio se ha podido aproximar a una ecuación exponencial:

$$C = 10^{-12} * e^{0,0624HR} \quad (25 - 55 \text{ HR})$$

$$C = 2 * 10^{-18} * e^{0,2849HR} \quad (60 - 80 \text{ HR})$$

Como se observa los valores a partir del 55% de humedad relativa evolucionan de una forma más pronunciada, haciendo que el valor de la capacidad del condensador sea

cada vez más grande. Los resultados observados demuestran el por qué al haber utilizado el eje de la capacidad anteriormente, de forma logarítmica, se observaba por separado como se aproximaban, en forma a una recta. En cualquier caso para poder adaptarlas se debería realizar un circuito de acondicionamiento que fuese capaz de interpretar estas curvas. A continuación se estudiará el caso de la impedancia y de su fase.

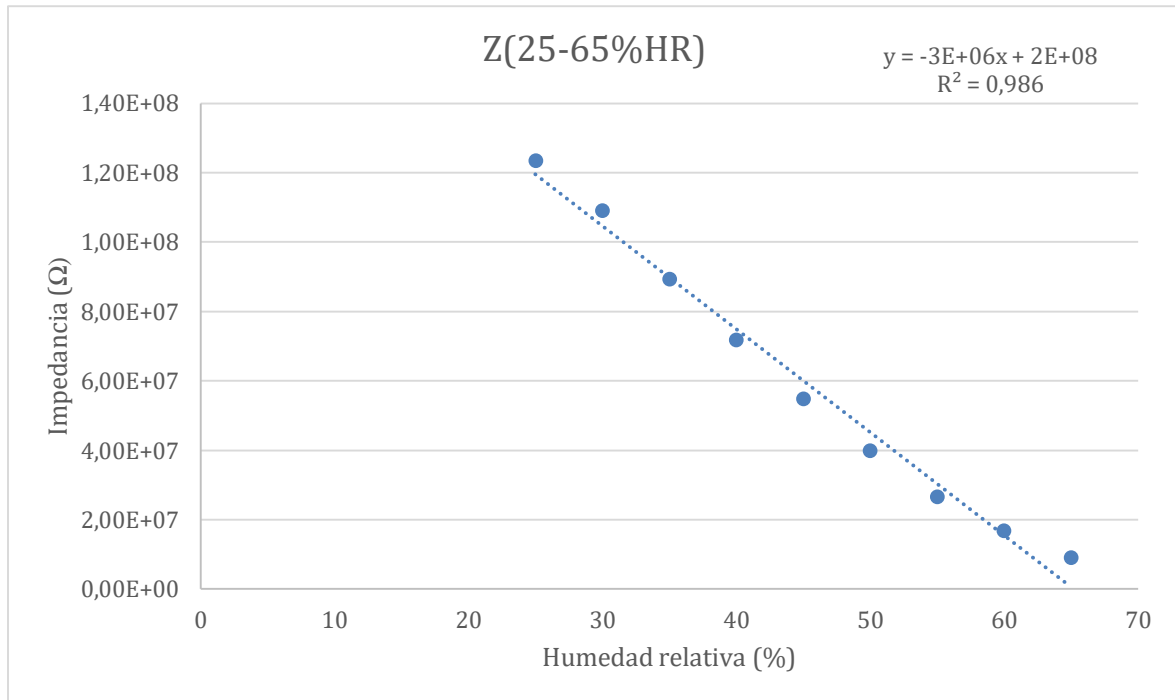


Ilustración 49: Regresión para los valores de la impedancia de 25-65 %HR

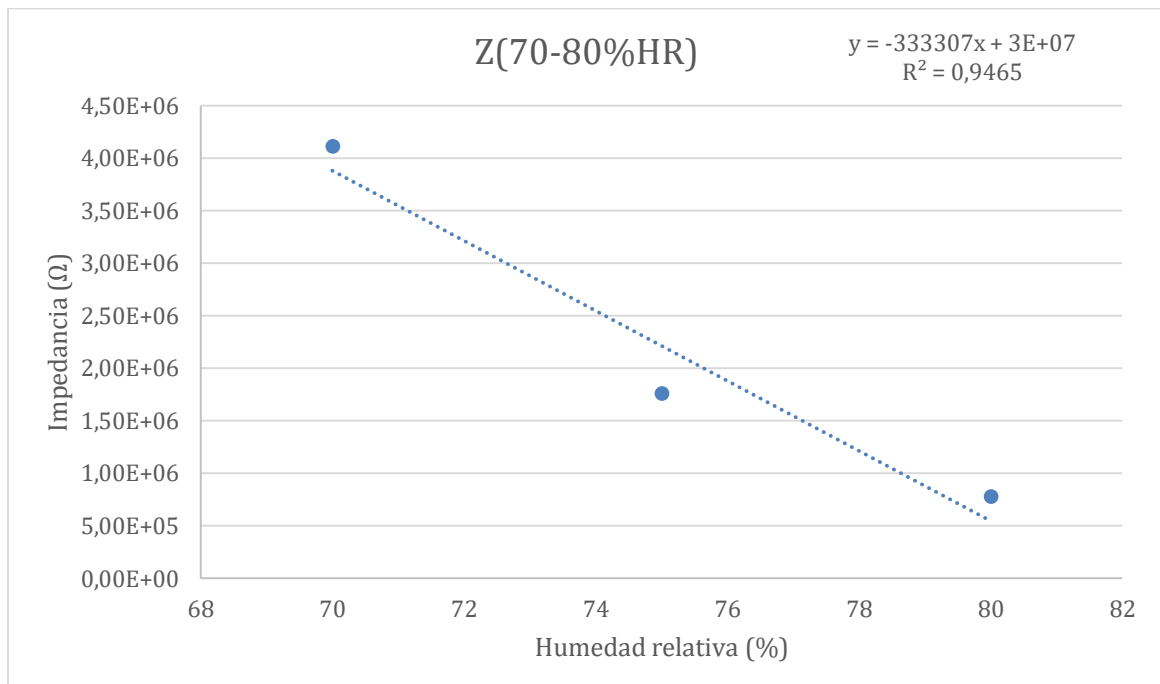


Ilustración 50: Regresión para los valores de impedancia de 70-80 %HR

Para los valores del módulo de la impedancia estudiados se observa una regresión lineal aceptable, hay que tener en cuenta que no se tienen muchos valores, y que la realización de la mediana estadística para cada valor de humedad relativa solo consta de 3 valores. Obviando esto se está obteniendo dos rectas muy próximas al comportamiento observado. En este caso también se ha realizado una regresión por partes, debido a la diferencia de evolución de los datos que se han estudiado. Incluso se espera que si se dividiese más esta regresión se obtendría una regresión mejor.

$$Z = -3 \cdot 10^6 HR + 2 \cdot 10^8 \quad (25 - 65 \%HR)$$

$$Z = -333307HR + 3 \cdot 10^7 \quad (70 - 80 \%HR)$$

Se observa que la recta para los valores altos de humedad esta menos ajustada que para los valores iniciales. Esto se podría solucionar usando otro de los tipos de regresión, que complicarían algo más el modelo de acondicionamiento.

Al haber conseguido dos regresiones lineales en el caso de la impedancia, despejar la HR de la fórmula es más sencillo y por tanto se obtiene la dirección directa de la humedad respecto a la impedancia.

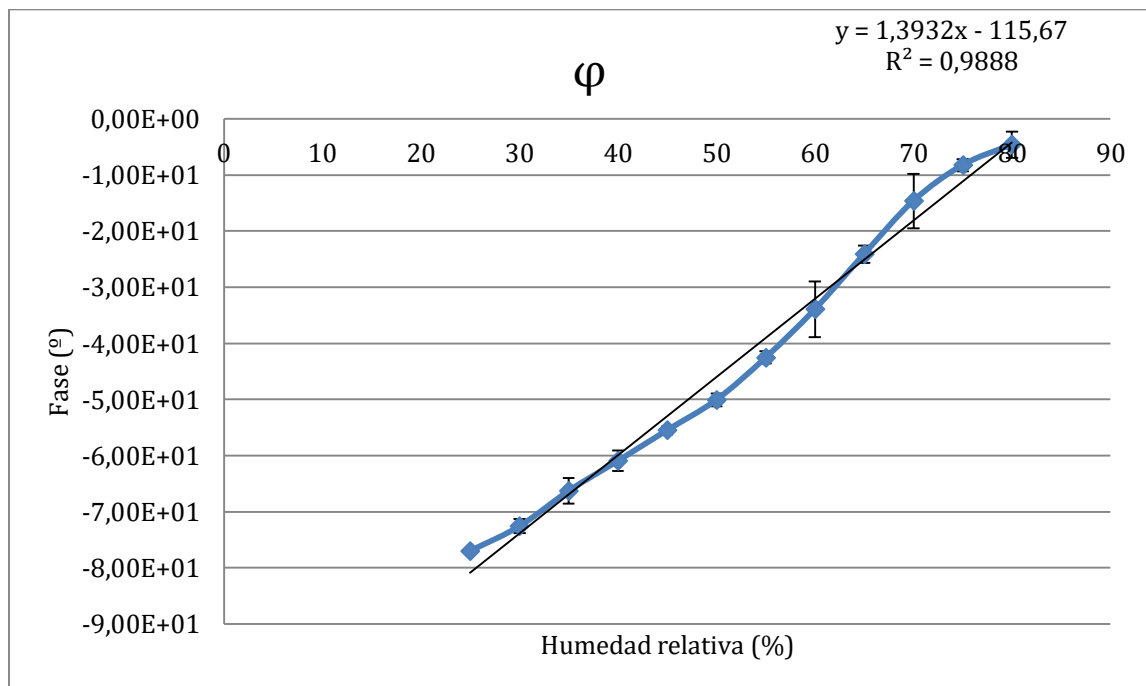


Ilustración 51: Regresión para los valores de fase de la impedancia

Como se observa para la fase de la impedancia, se obtiene una regresión lineal para todo el rango de humedades.

$$\varphi = 1.3932HR - 115.67$$

La regresión lineal te da la relación que existe entre la fase en grados con la humedad relativa. La aproximación de la recta en este caso es la más buena de las estudiadas en este apartado.

Para obtener con seguridad un modelo sobre el que poder trabajar y realizar la electrónica de acondicionamiento, sería necesario comprobar y estudiar más sensores a rango completo de humedad (25-100%) para cubrir de esta forma todo el rango de posibilidades.

En cualquier caso, si es posible se buscaría obtener una regresión lineal para la evolución de los valores, pero en el caso de que esto no sea posible se realizará la regresión del tipo que mejor aproximación tenga y después se realizará una linealización mediante electrónica o matemática, si fuese posible.

Con este apartado final se ha pretendido mostrar la relación que existe en el sensor, entre los valores de la impedancia del sensor, y la humedad a la que se encuentra. Este hecho permite demostrar que el sensor funciona, y que después del estudio, con un buen trabajo de integración y la realización de una electrónica capaz de traducir estos datos a través de las regresiones aportadas, se obtendría un sensor completamente funcional.

9 Acciones futuras

A lo largo de este trabajo se ha querido realizar un estudio sobre el sensor de humedad integrado en un tejido. Inicialmente se realizó una búsqueda sobre el estado actual del tema y se observó que a diferencia de técnicas de integración del sensor se obtenían resultados muy diferentes. Es por ello que durante la realización del estudio se tenía una idea de los resultados que se buscaban obtener. Y es por ello que los resultados finales plantean la posibilidad de continuar el estudio más en profundidad y con la certeza de que se obtendrán resultados muy interesantes.

Para poder profundizar en el análisis, estudio y diseño de un sensor de humedad, se podría considerar en primer lugar, un análisis del efecto de las diferentes variables de forma de la geometría del sensor. En el caso del estudio solo se varió de forma significativa el valor de la longitud de las ramas de los electrodos y se pudo observar el efecto que tenía en la capacidad de la geometría, pero hay otras variables, como el espacio entre ramas o el número de ramas, que en este estudio no se ha podido realizar por el tiempo que supondría.

En lo que al bordado se refiere se plantearon dudas durante el estudio, ya que al trabajar sobre tejidos de calada el bordado no modificaba en un valor significativo las propiedades del tejido, pero que pasaría si el tejido fuese un tejido de punto. Ese problema es uno de los que esta planteados y se pretende dar respuesta, junto al anterior nombrado en este apartado, en un futuro doctorado que se pretende realizar sobre la temática de estudio.

Y finalmente el estudio podría haber contenido un análisis sobre los circuitos de acondicionamiento que podrían ser utilizados por el sensor estudiado. Este estudio no se ha realizado por tiempo, pero que se plantea realizar durante el futuro doctorado ya nombrado que englobará estos estudios que por tiempo se han dejado fuera, además de un análisis más exhaustivo de las pruebas ya realizadas a esta geometría.

Planificación de tiempo

Una vez realizados estos estudios, más los adicionales que se plantearían en el futuro doctorado se tendría la información necesaria para saber la viabilidad del sensor en un uso diario como la capacidad de realizar un prototipo del mismo.

Tabla 26: Estimación de tiempos

Actividad	Descripción	Observaciones	Duración
Análisis de la geometría	Análisis de los diferentes factores de la geometría del sensor	Se realizaría el análisis de 4 variables	8 semanas
Análisis del bordado	Análisis de los patrones de bordado y del tejido de punto	Se utilizarán diferentes tejidos de punto	12 semanas
Realización circuito acondicionamiento	Análisis de las diferentes opciones y circuitos integrados	Se buscarán diferentes alternativas y necesitarán tamaño reducido	8 semanas

10 Viabilidad económica

Con el estudio ya realizado se llega al apartado donde se debe tratar los costes del mismo. En este caso se ha realizado el estudio mediante un ingeniero a tiempo completo, cuyas horas serán pagadas a 30€/h i se tendrán que contratar, además, dos asesores para apoyar a este ingeniero. Uno de ellos será un asesor textil y el otro un asesor de la parte electrónica. Estos asesores apoyarán al ingeniero, que debido a la transversalidad del estudio, necesitará conocimientos y asesoría de las dos ramas.

Tabla 27: Estimación coste/tiempo personal

Personal	Horas	Precio (€/h)	Costes
Ingeniero	300	30	9.000,00 €
Asesor Textil	25	100	2.500,00 €
Asesor Electrónica	25	100	2.500,00 €
Total			14.000,00 €

Para poder realizar el estudio completo se deberá alquilar una serie de espacios para poder trabajar de forma correcta. Además de que hay que mantener las maquinas del laboratorio en estado óptimo, como la cámara climática que deberá ser suministrada de agua para su correcto funcionamiento. E incluir aquí también la compra de los hilos y tejidos necesarios para el estudio.

Tabla 28: Estimación costes instalaciones y materiales

	Horas/Unidades	Precio (€/h o u)	Costes
Desplazamientos	9	5	45,00 €
Laboratorio	60	100	6.000,00 €
Agua C.C	1	6	6,00 €
Hilo conductor	1	463	463,00 €
Hilo algodón	1	5	5,00 €
Tejido algodón	1	10	5,00 €
Cuenta hilos	1	15	15,00 €
Total			6.539,00 €

Finalmente se observa que el coste final del estudio es de 20.539,00 €.

11 Viabilidad ambiental

Durante el estudio se ha podido observar varios puntos donde se puede tener un impacto ambiental por el proceso del estudio, además de por el futuro del proceso. Durante el estudio diferenciaremos dos periodos, el de diseño y el experimental.

Durante el periodo de diseño, se realiza un trabajo informático donde se realiza exclusivamente en el laboratorio frente a un pc. El consumo de energía eléctrica que deriva de esta actividad, en su mayoría, por la producción española de la misma, proviene de combustibles fósiles, mientras que la procedente de energía renovable es muy baja en comparación. En cambio a lo que se refiere al espacio donde se produce la ESEIAAT está actualmente implantando paneles solares en sus tejados que servirán de ayuda para disminuir el gasto en electricidad que provenga de la línea, y por tanto, disminuirá la energía proveniente de combustibles fósiles consumida por la universidad. Se realiza la actividad en un laboratorio iluminado por luz natural en su mayoría y durante la mayoría de las horas del día, y por tanto se evita encender las luces siempre que no se necesiten.

En lo que al proceso y materias primeras usadas en el proceso el impacto ambiental es muy extenso. Tanto los hilos usados, como el tejido, han necesitado de una serie de procesos industriales y más al ser algodón, donde se han realizado numerosos lavados y tratados químicos cuyos residuos han acabado en la depuradora. Estos residuos es necesario depurarlos por que provocan graves problemas a la fauna de los ríos y de los mares, así como al ecosistema. Estos procesos a lo largo de los años se han ido optimizando y mejorando, tanto la producción como la depuración y se están consiguiendo resultados prometedores para el futuro.

En el laboratorio, realmente, existen pocos desechos de material, el inconveniente más grave que plantea el proceso de integración del sensor, es la dificultad posterior de reciclar las fibras del tejido, haciendo necesario retirar el trozo de tejido donde está integrado el sensor y este ser tratado por separado.

12 Plan de seguridad

Durante este estudio se deberán tomar unas medidas de seguridad, que irán dirigidas a la salud y bienestar del trabajador. Estas medidas de seguridad diferencian entre las dos situaciones más comunes para el trabajador, pero que se especificarán en un plan conjunto.

En las situaciones donde el trabajador este realizando trabajos de oficina, este deberá mantener una buena posición, y por tanto deberá tener una silla y mesa con las alturas correctas. Los equipos informáticos deberán estar conectados a la red mediante un enchufe en buenas condiciones para protegerlos de posibles deficiencias de la red.

Para el proceso experimental del laboratorio se deberán seguir las consideraciones anteriores además de las correspondientes a cada una de las máquinas que se usarán. En primer lugar hablaremos de la bordadora, esta comportará un peligro de funcionamiento de los dedos del trabajador y por tanto en ningún caso se manipulará ni hilo ni tejido siempre y cuando la bordadora esté en funcionamiento. Antes de bordar se realizará una revisión de la aguja y de los mecanismos de la bordadora para prevenir posibles problemas en el bordado de los sensores, que puedan afectar a los hilos o al tejido. La bordadora es muy sensible al movimiento de la mesa y por tanto se evitará el movimiento cercano a la bordadora mientras esta esté trabajando.

Por otra parte durante el proceso de toma de las medidas en la cámara climática se deberá mantener la cámara en buenas condiciones. Al iniciar el proceso de medidas nos deberemos asegurar siempre del buen estado del agua de la cual se alimenta la cámara climática, se deberá revisar el interior de la misma por si existen restos de humedad de medidas anteriores, y una vez empiece la medida se deberá estar seguro de que el tapón situado en la parte izquierda de la cámara se encuentra correctamente cerrado.

En todos los casos los dispositivos deberán quedar desconectados una vez se abandone el laboratorio, con especial atención a la cámara climática.

13 Conclusiones

Para finalizar el estudio de sensores textiles para bioinstrumentación, en especial los sensores de humedad, se procede al desarrollo de las conclusiones a las que se ha llegado.

Inicialmente, el estado del arte, ha dado una visión de cómo día a día, cada vez más grupos están dedicando horas al estudio de este tipo de sensores textiles, debido a las grandes ventajas que aportan. Entre estas ventajas se encuentra que sean poco invasivos y que van integrados en las prendas de ropa, haciendo mucho más fácil su colocación, y mucho más cómodo para el usuario, el llevarlo puesto. Esto abre las posibilidades de utilización desde las médicas hasta las deportivas.

Entre todos los sensores sobre los que se está trabajando, el de humedad, es uno de los que más investigaciones están centrando, debido a la importancia de esta propiedad en algunas actividades para los deportistas o algunas situaciones médicas donde es muy importante la detección de humedad. El inconveniente que tiene hoy en día este sensor, y que es sobre el cual se trabajará en futuros estudios, es la solidez al lavado. Como todos los sensores de este campo en algunas situaciones y con algunos materiales, no está presentando una solidez al lavado suficiente para un uso diario.

Con este estudio se pretende aportar resultados, a una temática en constante evolución, y que ahora está teniendo una importancia mayor a la que tenía en los últimos años. Este tipo de proyectos y de temáticas necesita una gran interdisciplinaridad en sus ingenieros, que deben trabajar en equipo y aprender los unos de los otros, para lograr obtener buenos resultados.

Lo que si se ha observado en este estudio es la capacidad de realizar un sensor de humedad, de ser capaces de reproducir los resultados y de obtener unas regresiones que nos permitirían la interpretación de los valores de impedancia y poder traducirlos a valor de humedad relativa.

Observando los resultados propios y los resultados de los estudios que han dado soporte a este trabajo, se observa que se está realizando un camino de fondo y que cada vez está más cerca el uso de estos sensores por las personas de forma común. Aquí se presentará un problema de confianza con los usuarios. Ya se observa que algunos productos de entrada a los *smart textiles*, están teniendo malas opiniones por el simple desconocimiento de las personas y este hecho hace visible la necesidad de educar a los usuarios para el futuro cercano, donde el uso de sensores integrados en textiles será más común de lo que nos imaginamos, porque hasta las buenas ideas y los buenos productos, si no son aceptadas por el público, desaparecen sin poder evitarlo.

13.1 Principales contribuciones científicas del estudio.

- M. Martínez-Estrada, B. Moradi, R. Fernández-García*, I. Gil, 'Embroidery textile moisture sensor' Presented at the Eurosensors 2018 Conference, Graz, Austria. **Aceptado**
- M. Martínez-Estrada, B. Moradi, R. Fernández-García*, I. Gil, 'Reliability of embroidery textile sensor under washing cycles' Enviado a la revista **SENSORS**

14 Referencias

- [1] H. Carvalho, A. P. Catarino, A. Rocha, and O. Postolache, 'Health monitoring using textile sensors and electrodes: An overview and integration of technologies', *IEEE MeMeA 2014 - IEEE Int. Symp. Med. Meas. Appl. Proc.*, 2014.
- [2] G. Zhou *et al.*, 'Highly Sensitive Wearable Textile-Based Humidity Sensor Made of High-Strength, Single-Walled Carbon Nanotube/Poly(vinyl alcohol) Filaments', *ACS Appl. Mater. Interfaces*, vol. 9, no. 5, pp. 4788–4797, 2017.
- [3] J. Weremczuk, G. Tarapata, and R. Jachowicz, 'Humidity sensor printed on textile with use of ink-jet Technology', *Procedia Eng.*, vol. 47, no. November, pp. 1366–1369, 2012.
- [4] A. Jakubas, E. Lada-Tondyra, and M. Nowak, 'Textile sensors used in smart clothing to monitor the vital functions of young children', *2017 Prog. Appl. Electr. Eng. PAEE 2017*, pp. 5–8, 2017.
- [5] D. Shuaib, L. Ukkonen, J. Virkki, and S. Merilampi, 'The possibilities of embroidered passive UHF RFID textile tags as wearable moisture sensors', *2017 IEEE 5th Int. Conf. Serious Games Appl. Heal. SeGAH 2017*, 2017.
- [6] L. M. Castano and A. B. Flatau, 'Smart fabric sensors and e-textile technologies: A review', *Smart Mater. Struct.*, vol. 23, no. 5, 2014.
- [7] R. Soukup, A. Hamacek, L. Mracek, and J. Reboun, 'Textile based temperature and humidity sensor elements for healthcare applications', *Proc. 2014 37th Int. Spring Semin. Electron. Technol.*, pp. 407–411, 2014.
- [8] K. C. (Kuldip C. . Gupta, R. Garg, and I. J. Bahl, *Microstrip lines and slotlines*. Dedham, Mass. : Artech House, 1979.
- [9] G. Trindade, F. Martins, R. Dias, C. Oliveira, and J. Machado Da Silva, 'Novel textile systems for the continuous monitoring of vital signals: Design and characterization', *Proc. Annu. Int. Conf. IEEE Eng. Med. Biol. Soc. EMBS*, vol. 2015–Novem, pp. 3743–3746, 2015.
- [10] J. Voutilainen, *Methods and instrumentation for measuring moisture in building structures*. 2005.
- [11] H. Baskan *et al.*, 'Running functional sport vest and short for e-textile applications', *IOP Conf. Ser. Mater. Sci. Eng.*, vol. 254, no. 7, pp. 1–8, 2017.
- [12] D. Morris *et al.*, 'Wearable sensors for monitoring sports performance and training', *2008 5th Int. Summer Sch. Symp. Med. Devices Biosens.*, pp. 121–124, 2008.
- [13] L. M. Castano and A. B. Flatau, 'Smart fabric sensors and e-textile technologies: A review', *Smart Mater. Struct.*, vol. 23, no. 5, 2014.
- [14] B. M. Quandt, L. J. Scherer, L. F. Boesel, M. Wolf, G. L. Bona, and R. M. Rossi, 'Body-Monitoring and Health Supervision by Means of Optical Fiber-Based Sensing Systems in Medical Textiles', *Adv. Healthc. Mater.*, vol. 4, no. 3, pp. 330–355, 2015.
- [15] R. Bhunjun and R. W. Vogt, 'Sensor system for contactless and online moisture measurements', *IEEE Trans. Instrum. Meas.*, vol. 59, no. 11, pp. 3034–3040, 2010.
- [16] T. Pereira, P. Silva, H. Carvalho, and M. Carvalho, 'Textile moisture sensor matrix for monitoring of diSabled and bed-rest patients', *EUROCON 2011 - Int. Conf. Comput. as a Tool - Jt. with Conftele 2011*, pp. 1–4, 2011.